

SILVANO RODRIGUES BORGES

QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS EM RECUPERAÇÃO COM
FORRAGEIRAS E CAFEIEIRO PÓS-MINERAÇÃO DE BAUXITA

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

B732q
2013

Borges, Silvano Rodrigues, 1983-
Qualidade do solo em áreas em recuperação com forrageiras
e cafeeiro pós-mineração de bauxita / Silvano Rodrigues
Borges. – Viçosa, MG, 2013.
xi, 111f. : il. (algumas color.) ; 29cm.

Orientador: Ivo Ribeiro da Silva
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Áreas degradadas - Recuperação. 2. Adubos e
fertilizantes. 3. Cultivos de cobertura. 4. Forragem. 5. Solos -
Erosão. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de
Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 631.45

SILVANO RODRIGUES BORGES

QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS EM RECUPERAÇÃO COM
FORRAGEIRAS E CAFEIEIRO PÓS-MINERAÇÃO DE BAUXITA

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2013.



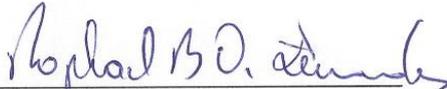
André Narvaes da Rocha Campos



Dilermando Miranda da Fonseca



Reinaldo Bertola Cantarutti



Raphael Bragança Alves Fernandes
(Coorientador)



Ivo Ribeiro da Silva
(Orientador)

Aos meus pais Antônio e Iolanda pelo incentivo e apoio nesta conquista, mas principalmente pelo amor, pelo exemplo humano e por serem meu alicerce, com muita gratidão.

Aos meus irmãos Paulo, João, Antônio, Jesuíno, Roseli e Rosania pelo apoio, estímulo e companheirismo.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por iluminar meu caminho.

Aos meus pais, irmãos e cunhados pelo apoio e incentivo incondicional.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos, pela oportunidade concedida para a realização do curso de Doutorado.

À empresa Companhia Brasileira de Alumínio – Votorantim Metais (CBA/VM), por disponibilizar a área de estudos, pelo financiamento do projeto e pela concessão da bolsa de estudos, e em especial aos funcionários Raul Demolinari, Ângelo, Evandro, Márcio e Rafael, pelo apoio na implantação e condução deste estudo.

Aos funcionários da empresa Brascom que dedicaram muito suor na implantação e condução dos experimentos em campo, em especial ao Geraldinho, Carlinhos, Chico e Nivaldo.

Ao Prof. Ivo Ribeiro da Silva, pela orientação, incentivo e amizade, concedendo-me esta oportunidade para minha formação.

Aos coorientadores Raphael Bragança Alves Fernandes e Marcos Rogério Tótola pela colaboração na realização deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. André Narvaes da Rocha Campos, Prof. Dr. Dilermando Miranda da Fonseca, Prof. Dr. Raphael Bragança Alves Fernandes e Prof. Dr. Reinaldo Bertola Cantarutti, por aceitarem prontamente o convite e por contribuírem com este trabalho com sugestões e críticas.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Solos da UFV pelo aprendizado e apoio.

Aos Prof. Víctor Hugo Alvarez V., Júlio César Lima Neves e Cosme Damião Cruz pelas dicas e sugestões nas análises estatísticas.

Ao técnico José Luiz pela ajuda indispensável na instalação dos experimentos, pela amizade e momentos de muita descontração.

Aos colegas do Laboratório de Isótopos Estáveis pela agradável convivência durante esses anos e pelas contribuições na realização deste trabalho.

Aos meus estagiários Laisa, Dener, Rogério, Ernst e Rafael, pela amizade e pela dedicação e zelo na condução dos experimentos, sem os quais este trabalho não teria alcançado a dimensão atual.

Aos amigos, integrantes e ex-integrantes da República “Os Pirigozo”, Franklin, Fernando, Bruno, Evaldo, Samuel, Cássio, Henrique e Ricardo, e a todos os amigos dos tempos de Graduação, Mestrado e Doutorado, pelos bons momentos vividos e apoio nos momentos difíceis.

À Nívea, pelo amor, carinho, atenção, paciência e companheirismo nos momentos difíceis e nas conquistas e à família Vieira pela agradável convivência.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho e para minha formação.

Minhas sinceras desculpas a todos que colaboraram nesta etapa da minha vida que não mencionei, por falta de minha memória, e que fazem parte dessa história!

A todos o meu “Muito Obrigado”

BIOGRAFIA

SILVANO RODRIGUES BORGES, filho de Antônio Borges e Iolanda Rodrigues Borges, nasceu em 15 de maio de 1983, em Guaçuí, ES.

Em 1998, concluiu o 1º grau na Escola Estadual Antônio Carneiro Ribeiro, em Guaçuí, ES.

Em 2001, concluiu o 2º grau e o curso Técnico em Agropecuária na Escola Agrotécnica Federal de Alegre – EAFA, em Alegre, ES.

Em 2007, diplomou-se em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

Em 2009, concluiu o curso de Mestrado em Ciência Florestal, na área de concentração em Silvicultura, pela Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

Em março de 2009, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, em nível de Doutorado, na área de concentração em Matéria Orgânica e Sustentabilidade de Agro-ecossistemas, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, submetendo-se à defesa de tese em fevereiro de 2013.

SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	3

CAPÍTULO I

PRODUTIVIDADE E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES POR FORRAGEIRAS E PERDAS DE ÁGUA, SOLO E NUTRIENTES NA FASE DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS MINERADAS DE BAUXITA.....	4
RESUMO.....	4
1. INTRODUÇÃO.....	5
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	7
2.1. Caracterização da área de estudo e instalação do experimento.....	7
2.2. Produção de matéria seca e extração de nutrientes pelas forrageiras.....	10
2.3. Perdas de água, solo e nutrientes por escoamento superficial.....	11
2.4. Análises estatísticas.....	12
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
3.1. Produção de matéria seca.....	13
3.2. Extração de nutrientes pelas forrageiras.....	16
3.3. Perdas de água, solo e nutrientes por escoamento superficial.....	18
4. CONCLUSÕES.....	22
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	22

CAPÍTULO II

ESTABILIDADE E ATRIBUTOS ORGÂNICOS DE AGREGADOS DO SOLO EM ÁREA PRÉ E PÓS-MINERAÇÃO DE BAUXITA EM RECUPERAÇÃO COM FORRAGEIRAS.....	25
RESUMO.....	25
1. INTRODUÇÃO.....	26
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
3.1. Efeito da mineração e do uso do solo pré-mineração.....	33
3.1.1. Estabilidade e distribuição do tamanho de agregados.....	33
3.1.2. Atributos orgânicos em agregados do solo.....	34
3.2. Efeito dos tipos de adubação e forrageiras na recuperação da área minerada.....	36
3.2.1. Estabilidade e distribuição do tamanho de agregados.....	37
3.2.2. Atributos orgânicos em agregados do solo.....	38
3.3. Similaridade entre áreas não mineradas, pós-reconfiguração e em recuperação com forrageiras após mineração de bauxita.....	42
4. CONCLUSÕES.....	45
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

CAPÍTULO III

CRESCIMENTO DO CAFEIEIRO E DE PLANTAS DE COBERTURA INTERCALARES E PERDAS DE ÁGUA E SOLO EM ÁREAS MINERADAS DE BAUXITA SOB DIFERENTES TIPOS DE ADUBAÇÃO.....

RESUMO.....	49
1. INTRODUÇÃO.....	50
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	52
2.1. Caracterização da área de estudo e instalação do experimento.....	52
2.2. Produção de matéria seca e extração de nutrientes pelas plantas de cobertura intercalares.....	56
2.3. Crescimento do cafeeiro.....	57
2.4. Perdas de água e solo por escoamento superficial.....	58
2.5. Análise estatísticas.....	59
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
3.1. Produção de matéria seca pelas plantas de cobertura intercalares.....	59
3.2. Extração de nutrientes pelas plantas de cobertura intercalares.....	62
3.3. Crescimento do cafeeiro.....	67
3.4. Perdas de água e solo por escoamento superficial.....	71
4. CONCLUSÕES.....	73
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

CAPÍTULO IV

QUALIDADE DO SOLO DE ÁREAS MINERADAS DE BAUXITA EM RECUPERAÇÃO COM CAFEIEIRO SOB DIFERENTES ADUBAÇÕES E PLANTAS DE COBERTURA INTERCALARES.....

RESUMO.....	78
1. INTRODUÇÃO.....	79
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	82
2.1. Caracterização da área de estudo e instalação do experimento.....	82
2.2. Amostragens e análise de solo.....	86
2.3. Análises estatísticas e elaboração do índice de qualidade do solo.....	88
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	91
4. CONCLUSÕES.....	104
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
CONCLUSÕES GERAIS.....	110

RESUMO

BORGES, Silvano Rodrigues, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2013. **Qualidade do solo em áreas em recuperação com forrageiras e cafeeiro pós-mineração de bauxita.** Orientador: Ivo Ribeiro da Silva. Coorientadores: Marcos Rogério Tótola e Raphael Bragança Alves Fernandes.

A mineração pode ser considerada uma das atividades mais impactantes ao solo, pois exige a retirada da vegetação e das camadas superficiais de solo, demandando a posterior recuperação da área com o mesmo tipo de uso pré-existente. Na Zona da Mata de Minas Gerais muitas das jazidas de bauxita encontram-se sob cultivos agrícolas e pastagens e, assim, surge o desafio de recuperar e monitorar a qualidade do solo (QS) e garantir o desenvolvimento sustentável de culturas agrícolas sobre essas áreas após a mineração. Neste sentido, o objetivo principal com este estudo foi avaliar as alterações na qualidade do solo em área de mineração de bauxita e o crescimento de forrageiras e do cafeeiro manejados com diferentes adubações e tipos de plantas de cobertura do solo. Os solos de áreas cobertas com mata nativa, cafeeiro (10 anos de idade) e pastagem foram usados com referências pré-mineração. Após a mineração e reconfiguração da área, amostras de solo foram coletadas e usadas como referência pós-reconfiguração, e, nessa área, foram implantados dois experimentos: **Experimento I:** implantação de forrageiras com quatro tipos de adubações (P - padrão da Empresa; C – adubação complementar com cama de aviário; Q – adubação química complementar; C+Q – adubação orgânica e química combinadas) e quatro tipos de cobertura do solo (SP – sem planta; B – braquiária (*Brachiária brizantha* cv. Piatã); E – estilosantes cv. Campo Grande; B+E – consórcio). Os tratamentos B e SP, adubados com C e Q foram selecionados para instalação de parcelas coletoras de perdas de água, solo e nutrientes por escoamento superficial. Em avaliações feitas durante 15,5 meses registraram-se melhor produção de matéria seca (MS) da B nas adubações complementares C (41,5 t/ha) e C+Q (40,3 t/ha) em relação a Q (24,0 t/ha) e P (18,9 t/ha), mas não houve diferença significativa para o E, e este não se desenvolveu no consórcio B+E. A braquiária com adubação C reduziu as perdas de água (-70,1 %) e solo (-61,9 %) em relação à adubada com Q. Observou-se grande impacto da mineração sobre os atributos orgânicos dos agregados (carbono orgânico total e lábil e nitrogênio total), mas não sobre a estabilidade dos agregados (DMP). A

adubação C e as forrageiras B e E contribuíram para aumentar os atributos orgânicos em agregados avaliados após 16 meses de recuperação, principalmente o E.

Experimento II: implantação de *Coffea arabica* com quatro tipos de adubação (T – sem adubação; C – cama de aviário no plantio (1/2 no sulco de plantio e 1/2 na entrelinha); Q – adubação química no plantio e em cobertura; C+Q – orgânica e química combinadas) e quatro tipos de plantas de cobertura do solo na entrelinha do cafeeiro (as mesmas usadas no Experimento I). Parcelas coletoras de água e solo foram instaladas na área com cafeeiro do mesmo modo que nas subparcelas com forrageiras no Experimento I. Atributos orgânicos, químicos, físicos e microbiológicos foram quantificados e selecionados antes da mineração, seis meses após a reconfiguração da área minerada e após 19 meses em recuperação para a construção de um índice de qualidade do solo (IQS), utilizando análises estatísticas uni e multivariadas. As adubações C e C+Q melhoraram a produção de MS das plantas de cobertura durante o primeiro ano de crescimento. O crescimento do cafeeiro, avaliado aos 21 meses, não diferiu entre as adubações C, Q e C+Q e foi reduzido acentuadamente pela B, mas em menor intensidade pelo E e B+E. Porém, a B reduziu as perdas de água e solo, principalmente quando adubada com C. As análises uni e multivariadas permitiram selecionar o carbono orgânico lábil, a soma de bases, a densidade do solo e a atividade da enzima fosfomoesterase ácida como um grupo mínimo de indicadores orgânicos, químicos, físicos e microbiológicos da qualidade do solo. A mineração reduziu em cerca de 65 % o IQS em relação ao cafeeiro não minerado. A adubação com cama de aviário, isolada ou combinada com a mineral, recuperou a QS, em média, em 23 % e as plantas intercalares de cobertura do solo contribuíram para recuperar a QS somente quando adubadas. Conclui-se que o crescimento de forrageiras sobre áreas mineradas de bauxita pode ser melhorado com adubação complementar com cama de aviário e o consórcio gramínea e leguminosa precisa ser melhor estudado. A adubação com cama de aviário e o uso de plantas intercalares de cobertura do solo contribuem para recuperar a QS e podem contribuir para a sustentabilidade da produção do cafeeiro sobre áreas mineradas de bauxita.

ABSTRACT

BORGES, Silvano Rodrigues, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2013. **Soil quality in areas undergoing reclamation with forage and coffee crop post bauxite mining.** Adviser: Ivo Ribeiro da Silva. Co-advisers: Marcos Rogério Tótola and Raphael Bragança Alves Fernandes.

Mining can be considered one of the most soil impacting activities because it is necessary remove the vegetation and topsoil layers. Following ore extraction it is mandatory the reclamation of land with the same previous use. In the Zona da Mata region, Minas Gerais State, Brazil, many bauxite ore bodies are under coffee and pasture fields. Therefore, the restoration and monitoring of soil quality (SQ) in order to ensure sustainable crop growth on these mining areas have been a challenge. This work was carried out with the main objective to evaluate changes in soil quality and the growth of forage and coffee crops managed with different fertilizations and soil cover intercrops during bauxite mine reclamation. Soils under native vegetation, coffee (10 years old) and pasture fields were sampled as references before mining. Soil samples were collected six months after the stockpiled topsoil redistribution and in this area two reclamation experiments were established: **Experiment I:** four cover crops (SP – no forage; B – grass (*Brachiaria brizantha* cv. Piatã); E – leguminous Estilosantes Campo Grande; B+E – grass and leguminous mix) using four different fertilizations (P – standard fertilization; C – additional poultry litter fertilization; Q – additional mineral fertilization; C+Q – combined additional C and Q fertilizations). The B and SP cover crops treatments with C and Q fertilizations were selected to install collectors for water, soil and nutrient losses by runoff. Evaluations during 15.5 months after planting pointed to greater grass (B) dry matter (DM) production under C (41.5 t/ha) and C+Q (40.3 t/ha) fertilizations than under Q (24.0 t/ha) and P (18.9 t/ha). However, no significant differences were observed in leguminous (E) DM production and this forage did not growth in association with grass. The B cover crop fertilized with C reduced water (-70.1 %) and soil (-61.9 %) losses compared to that fertilized with Q. Mining negatively impact aggregate organic attributes (total and labile organic carbon and total nitrogen), but did not affect the wet-aggregate stability (weighted mean diameter). Poultry litter fertilization and forages, especially E, contributed to increase the aggregate organic attributes after 16 months of

reclamation. **Experiment II:** *Coffea arabica* crop using four fertilizations (T – no fertilization; C – poultry litter fertilization (1/2 in planting furrow and 1/2 in inter-row); Q – mineral fertilization in the planting and throughout the experiment period; C+Q – organic and mineral fertilization combined) and four cover intercrops (the same plants used in the Experiment I). Collector plots were installed in the same way as in Experiment I forage splitplot. Organic, chemical, physical and microbial soil attributes were quantified and selected in the areas before mining, six months after the stockpiled topsoil redistribution and 19 months after reclamation to calculate a soil quality index (SQI), using uni-multivariate statistical analysis. The C and C+Q fertilizations improved cover crop DM production during the first growth year. No differences were observed on the coffee crop growth among C, Q and C+Q fertilizations after 21 months. The coffee growth was sharply reduced by B cover crop, but with lower intensity by E and B+E. On the other hand, B cover crop reduced water and soil losses, mainly when C fertilization was used. Labile organic carbon, exchangeable bases sum, soil bulk density and acid phosphomonoesterase activity were selected as a minimum data set, representing organic, chemical, physical and microbial indicators of soil quality. Mining reduced the SQI (-65 %) compared to no disturbed soil under coffee crop. Poultry litter fertilization, exclusive or combined with mineral fertilizer, restored soil quality on average 23 % and cover intercrops contributed to restore soil quality only where they were fertilized. We concluded that the forage growth on reclaimed bauxite mining areas can be improved if additional poultry litter is used to improve soil fertility. In addition, poultry litter fertilization and cover intercrops contributed to restore the soil quality and they can improve the sustainability of coffee crop production in reclaimed areas after bauxite mining.

INTRODUÇÃO GERAL

A degradação do solo implica na redução da capacidade produtiva, resultante do uso intensivo, causando mudanças e promovendo alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas, estando as principais causas da degradação relacionadas a desmatamentos, métodos de cultivo, sistemas agrícolas, mineração, uso de agroquímicos, etc. (Lal e Stewart, 1992). Portanto, a perda da qualidade do solo, além de um componente a ele inerente, determinado por suas propriedades físicas, químicas e biológicas, dentro das restrições impostas pelo clima e ecossistema, inclui um componente determinado pelas decisões de uso da terra (tipo de exploração) e práticas de manejo (modo de exploração) (Doran e Zeiss, 2000).

A mineração pode ser considerada uma das atividades mais impactantes ao solo, embora em geral, não afete grandes extensões territoriais (Reis, 2006). A mineração de bauxita caracteriza-se pela retirada da vegetação, intensa movimentação das camadas superficiais do solo e geração de rejeitos e outros substratos de difícil colonização por plantas, demandando a execução de ações que levem à recuperação dos sítios minerados. No Brasil as jazidas de bauxita se encontram principalmente sob florestas naturais, pastagens, plantios florestais e cultivos agrícolas. Dessa forma, as empresas mineradoras negociam o direito de exploração do minério com os “superficiários” (proprietários das terras), pagando-lhes os devidos *royalties*, e com o compromisso legal, ambiental e social de recuperação da área minerada com o mesmo tipo de uso pré-existente. Assim, surge o desafio de recuperar e monitorar a qualidade do solo, profundamente alterada pela atividade de mineração, e garantir o desenvolvimento das culturas de forma viável a médio e longo prazo.

Um dos desafios atuais da pesquisa é como avaliar a qualidade de um solo de maneira simples e confiável. Para isso, inicialmente, é preciso estar claro o que se entende por qualidade do solo, um conceito que ainda tem sido muito discutido, mas tem como consenso a ideia da capacidade do solo em funcionar efetivamente, tanto no presente como no futuro. Segundo Doran e Parkin (1994), a qualidade do solo pode ser conceituada como a capacidade desse recurso exercer várias funções, dentro dos limites do uso da terra e do ecossistema, para sustentar a produtividade biológica e manter ou melhorar a qualidade ambiental. Segundo esses mesmos autores, a qualidade do solo pode ser medida por meio da quantificação de alguns atributos, ou

seja, de propriedades físicas, químicas e biológicas, que possibilitem o monitoramento de mudanças, a médio e longo prazo.

A base científica que respalda a busca por indicadores de qualidade do solo é a compreensão de que esses indicadores estão direcionados para a avaliação e o monitoramento das condições do solo que o tornam um ambiente capaz de sustentar a vida (Dumanski e Pieri, 2000). De outra forma, esses indicadores devem ter capacidade e sensibilidade para medir e avaliar atributos e processos do solo que interfiram nas suas funções produtivas e ambientais. Neste sentido, as práticas de manejo que adicionam ou mantêm carbono em compostos orgânicos no solo (C orgânico) parecem estar entre as mais importantes para restabelecer, manter ou melhorar a qualidade do solo (Karlen et al., 1994). Sendo assim, essa característica se torna bastante norteadora para a busca de indicadores de qualidade do solo, pois mostra que os atributos candidatos a indicadores que tem íntima relação com a matéria orgânica do solo (MOS) têm maior chance de serem adequados para o objetivo em questão.

Neste contexto, para que se faça a recuperação de áreas degradadas pela mineração de bauxita de forma mais adequada, o desenvolvimento e avaliação de novas práticas de manejo do solo tornam-se fundamentais. Também, cabe ressaltar que pesquisas que contemplem as características orgânicas, físicas, químicas e microbiológicas do solo levam ao melhor entendimento dos componentes e funcionamento do ecossistema e possibilitam adotar práticas de manejo mais adequadas que recuperem a qualidade do solo em áreas mineradas.

Assim, foram estabelecidas as seguintes hipóteses para este estudo:

- a. A adubação orgânica com cama de aviário combinada com adubação mineral contribui para recuperar a qualidade do solo em áreas mineradas de bauxita;
- b. A adubação orgânica com cama de aviário combinada com adubação mineral proporciona maior crescimento do cafeeiro e das forrageiras sobre áreas mineradas de bauxita em recuperação;
- c. O uso de plantas de cobertura intercalares, principalmente leguminosa fixadora de nitrogênio (N_2), melhora o crescimento do cafeeiro e a qualidade do solo em áreas mineradas de bauxita;
- d. O consórcio de gramínea e leguminosa fixadora de N_2 é mais eficiente na recuperação da qualidade do solo do que o monocultivo destas forrageiras.

O objetivo principal com o presente estudo foi avaliar as alterações na qualidade do solo durante a recuperação de áreas de mineração de bauxita e o crescimento do cafeeiro e de forrageiras manejadas com diferentes adubações e coberturas do solo. Mais especificamente, pretendeu-se definir a melhor forma de:

- a. Recuperar a qualidade do solo e melhorar o crescimento do cafeeiro e de forrageiras cultivados em área após a mineração de bauxita com adubação química e orgânica;
- b. Melhorar a sustentabilidade da produção e a qualidade do solo por meio da introdução de cultivo intercalar de plantas de cobertura do solo nos plantios de café em área de exploração de bauxita.
- c. Reduzir as perdas de água, solo e nutrientes por escoamento superficial em áreas de mineração de bauxita em recuperação.
- d. Avaliar a qualidade do solo, elegendo um grupo mínimo de indicadores orgânicos, químicos, físicos e microbiológicos mais sensíveis aos impactos causados pela mineração e pelas práticas de manejo adotadas na recuperação da área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, v. 15, p. 3-11, 2000.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21. (Special publication, 35).

DUMANSKI, J.; PIERI, C. Land quality indicators: research plan. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 81, p. 155-162, 2000.

KARLEN, D. L.; WOLLWHAUPT, N. C.; ERBACH, D. C.; BERRY, E. C. SWAN, J. B.; EASH, N. S.; JORDAHL, J. L. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till. **Soil Tillage Residue**, v. 31, p. 149-167, 1994.

LAL, R.; STEWART, B. A. Need for land restoration. **Advanced in Soil Science**. v. 17, p. 1-11. 1992.

REIS, L. L. **Monitoramento da Recuperação Ambiental de Áreas de Mineração de Bauxita na Floresta Nacional de Sacará-Taquera, Porto Trombetas (PA)**. Seropédica: UFRRJ, 2006. 159 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Capítulo I

PRODUTIVIDADE E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES POR FORRAGEIRAS E PERDAS DE ÁGUA, SOLO E NUTRIENTES NA FASE DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS MINERADAS DE BAUXITA

RESUMO

As estratégias de adubação em áreas mineradas em recuperação com forrageiras devem propiciar rápida formação das mesmas com elevada produção inicial, contribuindo principalmente para a redução de processos erosivos, além de ser capaz de sustentar a produção das forrageiras sob pastejo a médio e longo prazo. Este estudo teve como objetivo avaliar a produção de biomassa e a extração de nutrientes pelas plantas e as perdas de água, solo e nutrientes por erosão em áreas cultivadas com diferentes plantas forrageiras e tipos de adubação após mineração de bauxita na fase de recuperação. O experimento foi instalado seis meses após a mineração e reconfiguração, avaliando-se o efeito de quatro tipos de adubação: i) padrão da Empresa (P); ii) adubação complementar com cama de aviário (C); iii) adubação química complementar (Q); iv) adubação química e cama de aviário combinadas (C+Q); e quatro tipos de cobertura do solo: i) sem planta (SP); ii) braquiária (B); iii) estilosantes (E); iv) consórcio braquiária-estilosantes (B+E). Durante 15,5 meses foram feitas quatro coletas para avaliação da produção de matéria seca (MS) e a exportação de nutrientes pelas forrageiras. Parcelas coletoras de água e solo foram instaladas nos tratamentos com braquiária adubada com cama de aviário (CB) e química (QB) e nos tratamentos sem planta forrageira (CSP e QSP) e amostras de água e sedimento foram retiradas para análises químicas. A produção acumulada de MS da braquiária foi maior nas adubações C (41,5 t/ha) e C+Q (40,3 t/ha) em relação à Q (24,0 t/ha) e P (18,9 t/ha). A produção de MS na adubação Q não diferiu de P. Não houve diferença entre adubações na produção acumulada do estilosantes (maior média de 16,9 t/ha), e este também não foi capaz de se estabelecer no consórcio B+E, havendo crescimento apenas da braquiária. A quantidade de nutrientes exportados pela braquiária foi maior em C e C+Q em relação à P, sendo que a exportação em Q não diferiu de P e de C+Q. De modo geral, a exportação de nutrientes foi maior para B em relação ao E. A adubação orgânica (CB) reduziu em 70,1 % as perdas de água e em 61,9 % as perdas de solo por escoamento superficial em relação à adubação química (QB). As perdas de nutrientes foram equivalentes entre as adubações orgânica e química, sendo que as maiores perdas ocorreram para COT, N, K, Ca e S. Conclui-se que a adubação complementar com cama de aviário aumenta a produção de MS da braquiária, mas não a do estilosantes e reduz as perdas de água e solo por escoamento superficial e que as elevadas taxas de exportação de nutrientes pela braquiária, particularmente N e K, indicam que poderá haver rápida exaustão de nutrientes e perda de produtividade das forrageiras nos primeiros anos de pastoreio.

Palavras-chave: Adubação, forragem, recuperação de áreas degradadas, erosão

1. INTRODUÇÃO

A constante redução da capacidade produtiva dos solos tem sido atribuída principalmente à erosão hídrica e ao manejo inadequado do solo. Outro aspecto de grande relevância é que o aporte de sedimentos oriundos de áreas erodidas promove o assoreamento de rios e lagos, comprometendo a qualidade da água e alterando a vida aquática, principalmente pela eutrofização das águas.

A mineração em geral não afeta grandes áreas se comparada com as áreas usadas para agricultura, pecuária, hidrelétricas, construção de rodovias, e outros usos. No entanto, os impactos causados pela mineração podem ser ampliados devido à erosão que resulta em empobrecimento do solo, assoreamento dos cursos d'água e deterioração da qualidade da água (Parrota et al., 2001). A importância desses processos e a magnitude com que ocorrem dependem de vários fatores como clima, relevo (declividade do terreno e comprimento do declive), tipo de solo, manejo das culturas e do solo, bem como das práticas conservacionistas utilizadas (Franco, 2010).

A mineração de bauxita caracteriza-se pela retirada da vegetação, intensa movimentação das camadas superficiais do solo e geração de rejeitos e outros substratos de difícil colonização por plantas, demandando a execução de ações que levem à recuperação dos sítios minerados. No Brasil as jazidas de bauxita se encontram principalmente sob florestas naturais, pastagens, plantios florestais e cultivos agrícolas. Dessa forma, as empresas mineradoras negociam o direito de exploração do minério com os “superficiários” (proprietários das terras), pagando-lhes os devidos *royalties*, e com o compromisso legal, ambiental e social de recuperação da área minerada com o mesmo tipo de cultura pré-existente. Assim, surge o desafio de elaborar estratégias de recuperação da qualidade do solo, profundamente alterada pela atividade de mineração, e garantir o desenvolvimento de culturas sobre essas áreas de forma viável a médio e longo prazo.

A adubação em áreas mineradas em recuperação com pastagens deve propiciar a rápida formação da forrageira com elevada produção inicial, desenvolvendo o seu sistema radicular e demais órgãos, de forma a cobrir e estabilizar o solo o mais rápido possível para diminuir o processo erosivo. Além disso, deve-se levar em consideração a necessidade de nutrientes das plantas forrageiras e, conseqüentemente, sua capacidade de extraí-los do solo (Costa et al.,

2010). Assim, conhecer a quantidade de nutrientes extraídos pelas forrageiras torna-se importante para avaliar a necessidade de reposição de nutrientes, maximizar a eficiência do uso de fertilizantes e minimizar impactos ambientais, decorrentes do excesso de fertilizantes.

A adoção de leguminosas na formação de pastagens, em consórcio ou exclusivas, em face da capacidade de fixação simbiótica do N₂ atmosférico e a sua contribuição para a produção animal, é essencial para diminuir custos com fertilização nitrogenada e incrementar a produtividade, constituindo um caminho na direção da sustentabilidade da recuperação de áreas mineradas com sistemas agrícolas e pecuários (Barcellos et al., 2008).

Dentre as leguminosas utilizadas, as do gênero *Stylosanthes* têm se destacado por possuírem sistema radicular profundo, boa produção de biomassa (8 a 14 t/ha em estandes puros), alta produção de sementes, adaptação a solos pobres e boa cobertura de solo, diminuindo processos erosivos. Em consórcio com gramíneas, como as do gênero *Brachiaria*, o estilosantes melhora a qualidade do pasto, devido ao seu alto valor nutritivo, e a taxa de lotação, aumentando a produtividade animal (Barcellos et al., 2008). Além disso, o nitrogênio introduzido no sistema pela mineralização dos resíduos vegetais da leguminosa pode aumentar em até 130 % a produção da gramínea (EMBRAPA, 2007).

Estudos que quantifiquem as perdas de água, solo e nutrientes em áreas mineradas em processo de recuperação são escassos, assim como estudos que avaliem a produção e sustentabilidade de atividades agrícolas sobre essas áreas. Esses estudos são essenciais para a compreensão da magnitude dos impactos causados e para o monitoramento da recuperação da área. Dessa forma, ações mais efetivas que minimizem a degradação do solo, que melhorem a qualidade da água e aumentem a produção das culturas podem ser adotadas em regiões mineradas. Assim, o objetivo com este estudo foi avaliar a produção de biomassa e a extração de nutrientes pelas plantas e as perdas de água, solo e nutrientes por escoamento superficial em áreas cultivadas com diferentes plantas forrageiras e tipos de adubação em áreas mineradas de bauxita em fase de recuperação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo e instalação do experimento

O estudo foi conduzido em condições de campo em propriedade localizada no município de São Sebastião da Vargem Alegre, na Zona da Mata de Minas Gerais, em área onde houve extração de bauxita sob concessão da Companhia Brasileira de Alumínio – Votorantim Metais. O solo dominante na região é o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico.

Após o processo de lavra, a área foi reconfigurada, o que consistiu nas seguintes operações: o subsolo exposto durante a lavra foi descompactado com subsolador equipado com hastes de 0,6 m de comprimento, espaçadas 0,4 m, tracionado por trator de esteira D6. Em seguida, o solo decapeado (horizontes A e B que se encontravam acima do minério e que foram removidos no processo de lavra) e que estava amontoado em leiras (durante 15 meses) foi espalhado na área, numa camada de 0,4 a 0,6 m, com o auxílio de um trator de esteira. Novamente o terreno foi descompactado com subsolador equipado com hastes de 0,6 m de comprimento, espaçadas 0,4 m, tracionado por trator de esteira D6, com uma passada paralela ao declive do terreno, seguida de uma passada perpendicular. Finalmente, terraços em nível foram construídos, distribuídos ao longo da pendente do terreno.

Amostras deformadas e indeformadas de solo nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm foram coletadas seis meses após a reconfiguração para caracterização química e física (Tabela 1) da área de estudo antes da aplicação dos tratamentos, conforme EMBRAPA (1997).

O experimento foi instalado seis meses após a reconfiguração da área minerada, utilizando o delineamento em blocos ao acaso, no esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. Os blocos experimentais foram alocados entre os terraços em nível. As parcelas mediam 33 x 15 m e receberam os tratamentos com adubação: P – adubação padrão utilizada pela Empresa com 2,0 t/ha de calcário dolomítico e 30,0 t/ha de cama de aviário (*in natura*, com aproximadamente 27 % de umidade); C – adubação orgânica complementar à adubação padrão (30 t/ha (base seca) de cama de aviário); Q - adubação química complementar à adubação padrão (3 t/ha de calcário dolomítico com 80 % de PRNT e 1,5 t/ha de fosfato natural reativo Bayóvar); C+Q – adubação orgânica e química combinadas complementares à

adubação padrão. Na Tabela 2 estão as fontes e quantidades de cada nutriente aplicado nos tratamentos com adubações complementares.

Tabela 1: Características físicas e químicas nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm de solo seis meses pós-reconfiguração de área minerada de bauxita.

Características do solo	Camada (cm)		
	0-20	20-40	40-60
pH (H ₂ O)	5,23	5,10	4,98
Carbono orgânico total (dag/kg)	1,45	1,32	0,99
Nitrogênio total (g/kg)	0,85	0,55	0,39
P (mg/dm ³)	1,05	0,74	0,78
K ⁺ (cmol _c /dm ³)	0,07	0,10	0,10
Ca ²⁺ (cmol _c /dm ³)	0,37	0,48	0,62
Mg ²⁺ (cmol _c /dm ³)	0,13	0,16	0,19
S (mg/dm ³)	4,58	11,50	18,50
Mn (mg/dm ³)	5,04	5,13	9,05
Fe (mg/dm ³)	174,91	187,34	156,68
Cu (mg/dm ³)	0,60	0,72	1,50
Zn (mg/dm ³)	1,25	1,06	1,27
Al ³⁺ (cmol _c /dm ³)	0,10	0,06	0,00
H + Al (cmol _c /dm ³)	3,91	4,09	3,55
Soma de Bases - SB (cmol _c /dm ³)	0,57	0,74	0,91
Capacidade de troca de cátions a pH 7 (cmol _c /dm ³)	4,48	4,83	4,46
Capacidade de troca de cátions efetiva (cmol _c /dm ³)	0,67	0,80	0,91
Saturação por bases (%)	12,72	15,32	20,40
Saturação por Al ³⁺ (%)	14,93	7,50	0,00
Fósforo remanescente (mg/L)	5,55	8,61	9,59
Argila (g/kg)	640,0	590,0	520,0
Silte (g/kg)	70,0	90,0	110,0
Areia (g/kg)	290,0	320,0	370,0
Densidade do solo (kg/dm ³)	1,25	1,33	1,42
Densidade de partículas (kg/dm ³)	2,89	2,88	2,83
Macroporosidade (dm ³ /dm ³)	0,32	0,26	0,22
Microporosidade (dm ³ /dm ³)	0,25	0,28	0,28
Porosidade Total (dm ³ /dm ³)	0,57	0,54	0,50
Umidade na capacidade de campo (kg/kg)	0,24	0,26	0,25
Diâmetro médio ponderado (mm)	3,19	3,13	3,13
Diâmetro médio geométrico (mm)	2,06	1,94	1,85

As subparcelas mediam 15 x 7 m, com uma área útil de avaliação de 48 m², sendo separadas por corredores de um metro de largura. Os tratamentos foram: SP - sem planta, mantendo a área limpa com aplicação de herbicida quando necessário; B - semeadura de braquiária (50 kg/ha de sementes viáveis de *Brachiaria brizantha*, cultivar Piatã); E - semeadura de estilósantes (cultivar Campo Grande, que é uma mistura de sementes de duas espécies: 80 % de *Stylosanthes capitata* e 20 % de

Stylosanthes macrocephala, com 5 kg/ha de sementes viáveis); B+E – consórcio braquiária-estilosantes (25 kg/ha de sementes viáveis de braquiária e 2,5 kg/ha de sementes viáveis de estilosantes).

Tabela 2: Fontes e quantidades totais de nutrientes adicionados na implantação das forrageiras braquiária e estilosantes com diferentes tipos de adubação complementar em área após mineração de bauxita.

Tipo de Adubação	Fonte	MS	N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Fe	Cu	Zn
		t/ha	-----kg/ha-----									
<i>Orgânica</i>	CA	30,0	597,3	271,1	625,8	145,3	426,7	106,1	11,0	244,1	1,6	10,1
	Calcário	3,0	-	-	-	851,2	217,1	-	-	-	-	-
<i>Orgânica</i>	CA	30,0	597,3	271,1	625,8	426,7	106,1	145,3	11,0	244,1	1,6	10,1
<i>Química</i>	FNR	1,5	9,9	195,1	1,6	483,0	5,3	20,3	0,1	0,1	0,0	0,1
	Total	-	607,2	466,2	627,4	1.760,8	328,5	165,6	11,1	244,2	1,6	10,2
	Calcário	3,0	-	-	-	851,2	217,1	-	-	-	-	-
<i>Química</i>	FNR	1,5	9,9	195,1	1,6	483,0	5,3	20,3	0,1	0,1	0,0	0,1
	Total	-	9,9	195,1	1,6	1.334,2	222,3	20,3	0,1	0,1	0,0	0,1
<i>Padrão</i>	Adubação padrão da Empresa¹											

CA = cama de aviário; FNR = fosfato natural reativo; MS = massa seca.

¹2,0 t/ha de calcário dolomítico e 30,0 t/ha de cama de aviário *in natura* (27 % de umidade).

A cama de aviário e o calcário foram aplicados em área total e incorporados na camada de 0-15 cm, 30 dias antes da semeadura. O fosfato natural reativo foi aplicado no fundo do sulco de semeadura. As sementes de braquiária ou estilosantes foram semeadas em 01/12/2010 em sulcos de 0,02 m de profundidade e espaçados 0,25 m, dispostos perpendicularmente à pendente do terreno. No tratamento com consórcio braquiária-estilosantes, semeou-se uma linha de braquiária intercalada com uma de estilosantes.

Dados de pluviosidade e temperaturas máxima e mínima (Figura 1) foram obtidos em estação climatológica automatizada instalada no local do experimento, com armazenamento dos dados a cada 24 horas.

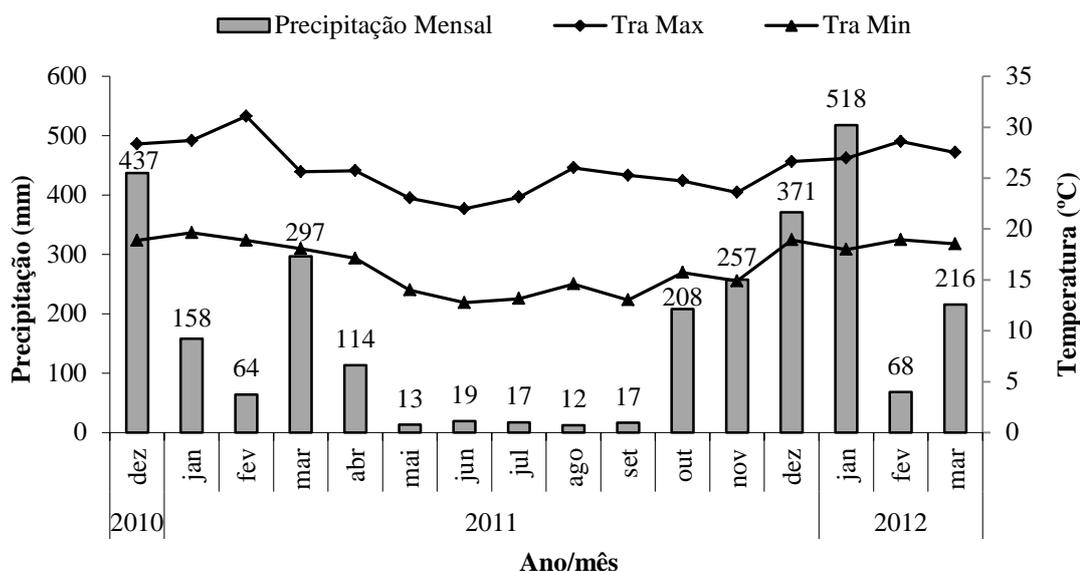


Figura 1: Precipitações mensais e médias mensais das temperaturas máxima (Tra Max) e mínima (Tra Min) no período de duração do experimento.

2.2. Produção de matéria seca e extração de nutrientes pelas forrageiras

Ao longo de 15,5 meses (01/12/2010 a 15/03/2012) fizeram-se coletas para avaliar a produção a 105, 175, 378 e 470 dias após a semeadura. Após cada coleta, fez-se o corte de uniformização, assim os períodos de crescimento após a primeira coleta foram de 70, 203 e 92 dias, respectivamente. Para escolha do momento do corte utilizou-se como critério o início do florescimento da braquiária.

As amostras vegetais foram coletadas sistematicamente em duas faixas de 0,5 m de largura por 4,0 m de comprimento, localizadas a 4,0 m de cada extremidade da subparcela (sentido do maior comprimento), totalizando uma área coletada igual a 4 m²/subparcela, dentro da área útil. O corte da braquiária foi feito a uma altura de 0,20 a 0,25 m da superfície do solo e o do estilosantes de 0,10 a 0,15 m para permitir a rebrotação das plantas. A forragem coletada foi reunida em uma única amostra e a massa fresca quantificada no campo. Uma subamostra foi retirada, lavada em água destilada e seca em estufa de ventilação forçada a 60 °C por 72 horas para determinação da matéria seca (MS) e, em seguida, foi triturada em moinho tipo Wiley com peneira de malha de 0,5 mm para análise química posterior.

O restante da forrageira da subparcela (área não coletada na amostragem) foi cortada e retirada da área.

Subamostras foram mineralizadas com ácidos nítrico e perclórico a quente na proporção 3,5:1, e as concentrações de P (colorimetria), K (fotometria de chama), S (turbidimetria), Ca, Mg, Mn, Fe, Cu e Zn (espectrometria de absorção atômica) foram determinadas no extrato. O teor de N nas amostras foi determinado por meio de digestão sulfúrica, seguida de destilação semi-micro Kjeldahl (Bataglia et al., 1983).

A quantidade de nutriente exportada pela biomassa em cada corte foi calculada pela fórmula: nutriente exportado (kg/ha) = [matéria seca (t/ha) x teor do nutriente (g/kg)]. A quantidade de cada nutriente acumulada no período foi obtida pela soma das quantidades do nutriente nas quatro coletas.

2.3. Perdas de água, solo e nutrientes por escoamento superficial

Os tratamentos com adubação orgânica e com adubação química, contendo braquiária como planta forrageira e sem planta de cobertura, foram selecionados para avaliação das perdas de água, solo e nutrientes por escoamento superficial, totalizando quatro tratamentos avaliados (QB – braquiária com adubação química; CB – braquiária com adubação orgânica com cama de aviário; QSP – sem planta forrageira e adubação química; CSP – sem planta forrageira e adubação orgânica com cama de viário). As avaliações foram efetuadas em parcelas coletoras com dimensões de 4,0 x 12,0 m, instaladas nas subparcelas dos respectivos tratamentos. As parcelas coletoras foram contornadas com chapas de PVC com 0,20 m de largura, que foram enterradas 0,10 m no solo. O comprimento maior obedeceu ao sentido do declive, sendo escolhidos locais com o declive médio característico da área estudada (Figura 2A).

Na parte inferior das parcelas foram construídas caixas de concreto, medindo 4,0 x 0,3 x 0,4 m (comprimento x largura x profundidade) onde eram coletadas a água e o solo perdidos por escoamento superficial (Figura 2B). Canos de PVC de 50,0 mm de diâmetro foram instalados na parte superior das caixas para conduzirem a água, após o enchimento, até tanques de plástico com capacidade de 200 L.

A água perdida era quantificada após cada chuva e o solo a cada três meses. Amostras de solo eram retiradas para análises químicas conforme EMBRAPA (1997).



Figura 2: Parcela coletora de água e solo perdidos por escoamento superficial em área em recuperação com pastagem após mineração de bauxita. A) contorno da parcela coletora com chapas de PVC; B) caixa coletora construída em concreto.

As amostras de água foram passadas em filtro de acetato de celulose com poros de 0,45 μm e, em seguida, armazenadas sob refrigeração (4 °C) até o momento das análises. Foram determinados o pH por potenciometria e as concentrações de nitrogênio total (soma de N-NH₄ e N-NO₃ determinados por colorimetria, conforme metodologias descritas por Kempers e Zweers (1986) e Yang et al. (1998), respectivamente), P (colorimetria), K⁺ (fotometria de chama), S (turbidimetria), Ca, Mg, Mn, Fe, Cu e Zn (espectrometria de absorção atômica).

As amostras de solo perdido foram secas ao ar e passadas em peneira com malha de 2 mm. Foram determinados o pH em água (1:2,5) por potenciometria; o P e o K foram extraídos com Mehlich-1 e determinados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente; Ca²⁺ e Mg²⁺ foram extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por espectrofotometria de absorção atômica; o Fe, Zn, Cu e Mn foram extraídos com Mehlich-1 e determinados por espectrofotometria de absorção atômica. O nitrogênio total do solo foi determinado por destilação Kjeldahl após digestão sulfúrica (Bataglia et al., 1983) e o carbono orgânico total determinado em subamostras trituradas e passadas em peneira com malha de 0,149 mm pelo método de oxidação via úmida, com aquecimento externo (Yeomans e Bremner, 1988).

2.4. Análises estatísticas

Os dados de matéria seca, por coleta e acumulada em quatro coletas, de quantidades de nutrientes extraídos por hectare (acumulados nas quatro coletas) e o total de água, solo e nutrientes perdidos por escoamento superficial durante o período

de avaliação foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelos testes F ou Tukey a 10 % de probabilidade de erro, utilizando o programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2011). Quando necessário, os dados foram transformados para \sqrt{Y} ou $\ln Y$, adicionando-se as constantes 0,5 ou 1,0, se necessárias, para que os desvios seguissem a distribuição normal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Produção de matéria seca

Houve interação significativa ($p < 0,05$) entre o tipo de forrageira com o tipo de adubação para a produção no 1º e 3º corte e no total acumulado do período. Os tratamentos que receberam cama de aviário (C e C+Q) aumentaram a produção de MS da braquiária (B) no 1º e no 3º corte e no total acumulado do período de 15,5 meses, diferindo significativamente ($p < 0,1$) dos tratamentos Q e P (Figura 3). O tratamento com adubação química complementar (Q) não diferiu da padrão na produção de MS e foi semelhante a C+Q apenas no primeiro corte. Resultados semelhantes foram obtidos por Barnabé et. al. (2007) que obtiveram maior produção de MS de *B. brizantha* cv. Marandu fazendo uso de adubação orgânica com dejetos de suínos (6,4 t/ha contra 2,5 t/ha da testemunha, durante três meses).

Quanto ao estilosantes, a produção de MS não diferiu entre as adubações C, C+Q e Q, assim como estas também não apresentam efeito sobre a produção no 1º, 4º e no acumulado do período comparadas à adubação padrão da Empresa (Figura 3). Porém, as adubações C e C+Q aumentaram significativamente ($p < 0,1$) a produção de MS do estilosantes no 3º corte em relação à adubação padrão e a adubação C também aumentou a produção no 2º corte.

De modo geral, a braquiária apresentou produção de MS superior ao estilosantes em todos os tipos de adubação, exceto no 3º corte (adubação química) e no 4º corte (todas as adubações), quando não houve diferença ($p > 0,1$). As elevadas quantidades de nutrientes (Figura 4) exportadas pela braquiária na fase inicial do crescimento (1º e 2º cortes) pode ter levado à redução da disponibilidade de nutrientes no solo, principalmente após o terceiro corte, sendo uma das possíveis razões da diminuição da produção de MS desta forrageira. Enquanto isso, o estilosantes foi capaz de manter o crescimento, possivelmente por apresentar crescimento inicial mais lento (Figura 3), o que demanda menos nutrientes,

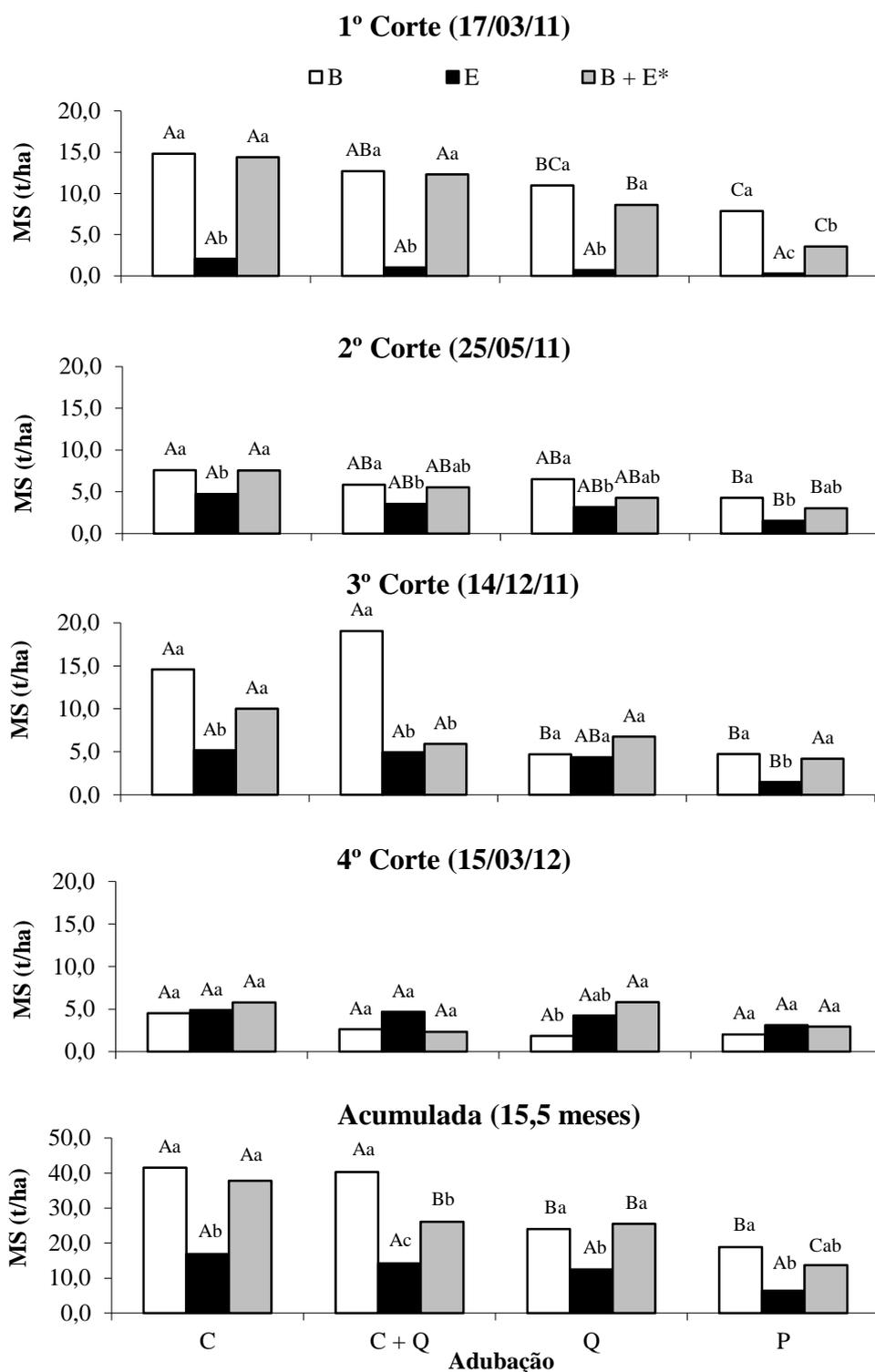


Figura 3: Médias de produção de matéria seca da parte aérea de braquiária e estilosantes aos 105 (1ª corte), 175 (2ª corte), 378 (3º corte) e 470 (4º corte) dias após semeadura e acumulada durante os 15,5 meses (01/12/10 a 15/03/12) sob diferentes adubações em área em recuperação após mineração de bauxita. *Produção apenas da braquiária. C = adubação com cama de aviário; Q = adubação química; P = adubação padrão da Empresa; B = braquiária; E = estilosantes; Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro cada tipo de planta forrageira, e minúscula dentro de cada tipo de adubação, não diferem a 10 % pelo teste Tukey.

e pelo suprimento de N derivado da fixação biológica (EMBRAPA 2007).

No consórcio braquiária-estilosantes (B+E), o estilosantes não foi capaz de se desenvolver devido a competição pela gramínea, havendo neste tratamento, portanto, produção de massa vegetal apenas da braquiária. No 1º corte, os tratamentos C e C+Q foram superiores aos tratamentos Q e P. No 2º corte, os tratamentos C+Q e Q tiveram produções equivalentes, e somente C foi superior à padrão. Porém, no 3º e 4º cortes não foram observadas diferenças ($p > 0,1$) entre os tratamentos. No acumulado do período, as produções de MS em todos os tipos de adubação foram superiores à da padrão, sendo que a adubação com cama de aviário isolada foi a que apresentou a maior produção (37,8 t/ha) diferindo significativamente dos tratamentos C+Q e Q.

Foi observado no tratamento B+E que o crescimento inicial do estilosantes era muito lento comparado ao da braquiária e, desta forma, o sombreamento gerado pela braquiária causou a senescência da leguminosa, não permitindo seu desenvolvimento. O estilosantes cv. Campo Grande se desenvolve melhor em consórcio com gramíneas em solos de baixa fertilidade e com teores de argila de até 35 %, pois solos de alta fertilidade possibilitam melhor desenvolvimento da gramínea, a qual pode competir com a leguminosa e prejudicar a sua persistência (EMBRAPA, 2007).

O estilosantes cv. Campo Grande em consórcio com gramíneas (na proporção de 20 a 40 % da leguminosa) pode fixar, em média, de 60 a 80 kg/ha ano de N (EMBRAPA, 2007), melhorando a dieta dos animais no primeiro ano. A partir do segundo ano, outro benefício se refere à ciclagem de nutrientes pela morte da leguminosa, e o N fixado pelo estilosante é mineralizado e transferido para a gramínea, sendo apontado como uma das principais causas do aumento da capacidade produtiva do consórcio (Cantarutti e Boddey, 1997; Schunke e Silva, 2003). A maior capacidade de produção do sistema de consórcio braquiária-estilosantes foi confirmada nos estudos conduzidos por Castro et. al. (1999), Andrade et. al. (2002), Paciullo et al. (2003) e Volpe et al. (2008). Nestes trabalhos, ao contrário do obtido no presente estudo, houve crescimento do estilosantes no consórcio e este contribuiu para melhoria da produção total de forragem. Dessa forma, estratégias de consórcio de leguminosa fixadora de N₂ com braquiária no estabelecimento de forrageiras sobre áreas mineradas devem ser melhor avaliadas em estudos futuros.

A maior produtividade média da *Brachiaria brizantha* obtida no presente estudo, de 41,51 t/ha em 15,5 meses (tratamento com cama de aviário), o que equivale a 32,1 t/ha no 1º ano, estão acima das obtidas por Durigon et al. (2002) (16,3 t/ha ano) em Paraíso do Sul, RS, por Primavesi et al. (2006) (13,07 t/ha de novembro de 2000 a maio de 2001) e por Euclides et al. (2008) (25 t/ha ano) em Campo Grande, MS. No entanto, estão próximas das obtidas por Aguiar et al. (2004), que encontraram produções médias de três anos de 34 t/ha ano em Selviria, MS, porém em pastagens irrigadas e manejadas. Oliveira et al. (2012) também obtiveram altas produtividades de braquiária (17,54 t/ha de MS de dezembro de 2008 a março de 2009), utilizando adubação com superfosfato simples (70 kg/ha de P₂O₅) na região de Alta Floresta, MT. Tais diferenças nas produtividades podem estar relacionadas às diferentes condições experimentais como clima, textura do solo, disponibilidade de nutrientes, tipos e quantidades de fertilizantes, manejo da forrageira e cultivar utilizada.

3.2. Extração de nutrientes pelas forrageiras

Não houve interação significativa ($p > 0,05$) entre tipos de adubação e tipo de planta forrageira na extração de nutrientes por unidade de área pelas forrageiras (Figura 4), exceto para o K. As quantidades de K extraídas pela braquiária nas adubações C e C + Q foram superiores àquelas nas adubações Q e P. Porém, não houve diferença ($p > 0,1$) entre as adubações quanto às quantidades de K extraídas pelo estilosantes.

Em média, as quantidades dos nutrientes N, P, S, Mg, Mn, Cu e Zn extraídos pela braquiária (B e B+E) foram superiores às exportadas pelo estilosantes, exceto para o Cu onde B+E foi similar ao estilosantes (Figura 4). Quanto ao Fe as quantidades exportadas não diferiram entre as forrageiras. As quantidades de Ca extraídas pelo estilosantes foram muito superiores às da braquiária (em média 129,4 kg/ha do E, contra 38,5 kg/ha da B e B+E). As leguminosas apresentam maior capacidade de troca de cátions radicular do que as gramíneas e, com isso, cátions divalentes (como o Ca) são absorvidos em maiores quantidades pela leguminosa (Silva et al., 2009). Desse modo, além do N fixado biologicamente, a alta capacidade de reciclagem de Ca do estilosantes também pode beneficiar a braquiária, quando o consórcio for bem estabelecido.

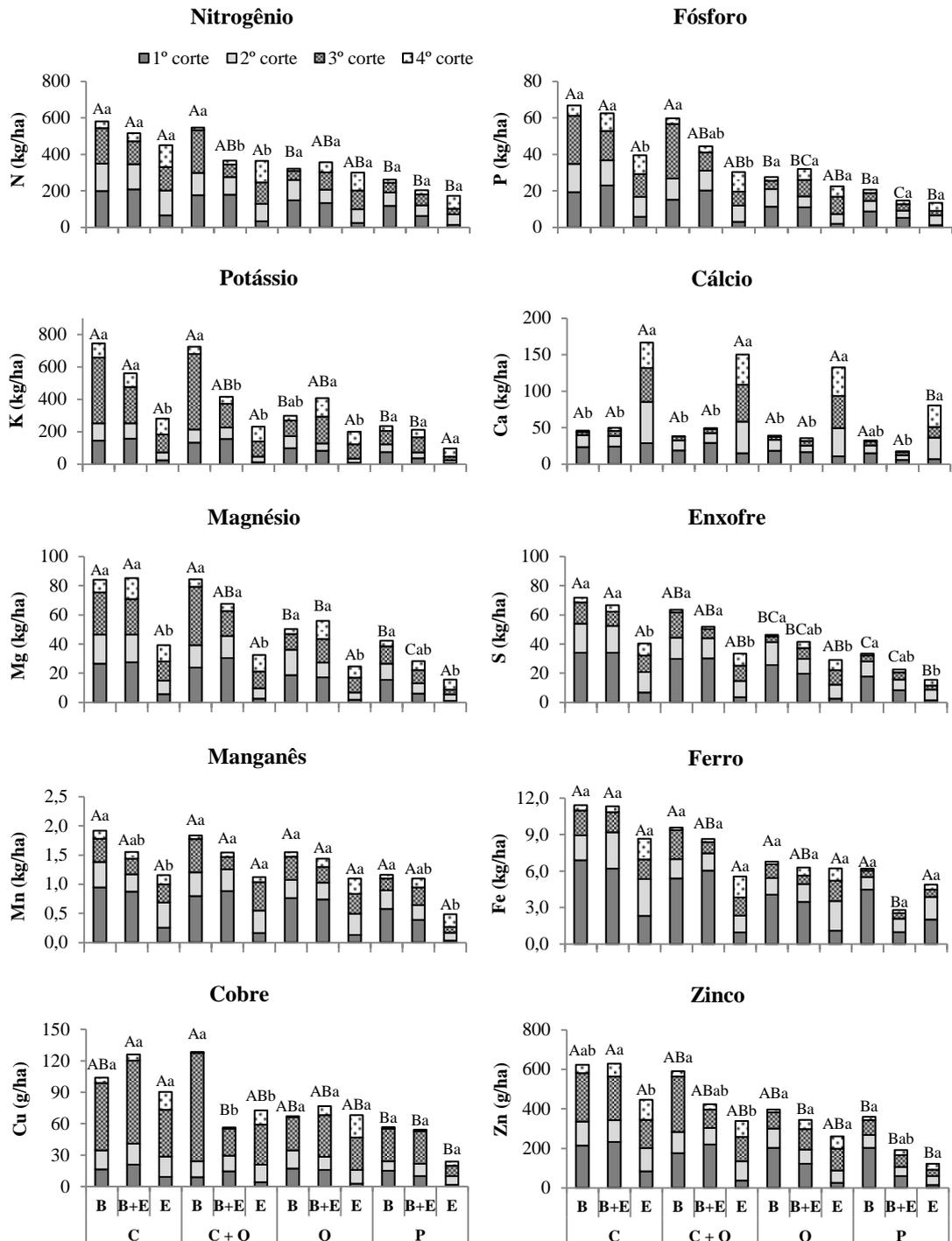


Figura 4: Quantidades médias de macro e micronutrientes exportados por hectare na parte aérea de braquiária e estilosantes aos 105 (1ª corte), 175 (2ª corte), 378 (3º corte) e 470 (4º corte) dias após plantio, durante 15,5 meses de crescimento (01/12/10 a 15/03/12), sob diferentes adubações de implantação em área em recuperação após mineração de bauxita. C = adubação complementar com cama de aviário; Q = adubação química complementar; C+Q = adubação orgânica e química combinadas; P = adubação padrão da Empresa; B = braquiária; E = estilosantes. Letras maiúsculas comparam médias acumuladas de adubação dentro de cada tipo de planta forrageira e minúsculas comparam plantas forrageiras dentro de cada tipo de adubação pelo teste Tukey a 10 %.

Quanto ao efeito da adubação nas quantidades de nutrientes exportados, os tratamentos C e C+Q foram equivalentes para todos os nutrientes e diferiram da adubação padrão, exceto para o Mn que não houve efeito das adubações. A exportação de todos os nutrientes no tratamento com adubação química (Q) foi equivalente à padrão e também equivalente ao tratamento C+Q. É importante levar em consideração que toda a área experimental recebeu uma adubação com cama de aviário e calcário (padrão da empresa) e que o tratamento Q no experimento recebeu apenas calcário e fosfato natural reativo, o que pode ter levado a adubação padrão a ter resposta equivalente à química, tanto na produção de MS, quanto na quantidade de nutrientes exportados.

De modo geral, as quantidades de nutrientes extraídos (Figura 4) pela braquiária (B e B+E) apresentaram a seguinte ordem decrescente no tratamento C: K>N>Mg>S>P>Ca>Fe>Mn>Zn>Cu; no tratamento C+Q há uma inversão apenas entre P e Ca em B+E; e no tratamento Q e no padrão há uma inversão na ordem entre P e Ca (em B e B+E) e também entre N e K em B. O estilostes apresentou a seguinte ordem no tratamento C: N>K>Ca>S>P>Mg>Fe>Mn>Zn>Cu; nos tratamentos C+Q e Q há uma inversão na ordem entre P e Mg; e na adubação padrão a ordem foi: N>K>Ca>Mg>S>P>Fe>Mn>Zn>Cu. Os resultados de extração de K e N e micronutrientes obtidos no tratamento C neste estudo são semelhantes aos obtidos por Primavesi et al. (2006), que encontraram maiores extrações de K, seguida de N para *B. brizantha*, porém difere dos macronutrientes Ca, Mg, P e S.

3.3. Perdas de água, solo e nutrientes por escoamento superficial

As médias das perdas totais de água e solo foram significativamente menores ($p < 0,1$) no plantio de braquiária com adubação orgânica (CB) em relação à braquiária com adubação química (QB) (Tabela 3). A braquiária adubada com cama de aviário também foi o único tratamento onde a tendência de aumento nas perdas mensais de água não acompanhou o aumento das chuvas (Figura 5), exceto nos primeiros meses após o plantio, quando a braquiária ainda não apresentava uma boa cobertura do solo, independente do tratamento. No final do período de avaliação, o total das perdas de água variaram em média de 151,67 m³/ha (CB) a 832,49 m³/ha (QSP), o que corresponde a 0,54 % e 2,99 %, respectivamente, da precipitação do período (Tabela 3). As parcelas sem plantio de braquiária apresentaram as maiores

perdas de água e de solo, tanto na adubação orgânica, quanto na química, conforme era esperado devido à exposição do solo ao impacto direto da chuva e ausência de barreiras ao escoamento.

Tabela 3: Médias das perdas acumuladas de água e solo e porcentagem da precipitação perdida por escoamento superficial, durante o período de dezembro de 2010 a março de 2012, em áreas em recuperação após mineração de bauxita, cobertas com braquiária e sem cobertura do solo, adubadas com cama de aviário e adubação química.

Precipitação Acumulada (mm)	Adubação	Cobertura do solo	Escoamento (m ³ /ha)	% da precipitação perdida	Perda de solo (t/ha)
2.786,90	C	B	151,67 ^{Bb}	0,54	16,00 ^{Bb}
		SP	660,56 ^{Aa}	2,37	74,45 ^{Aa}
	Q	B	506,92 ^{Ab}	1,82	41,97 ^{Ab}
		SP	832,49 ^{Aa}	2,99	87,18 ^{Aa}

C- cama de aviário; Q – adubação química; B – braquiária; SP – sem planta de cobertura do solo. Letras maiúsculas comparam adubação dentro de cada tipo de cobertura do solo e letras minúsculas comparam cobertura do solo dentro de cada adubação a 10 % pelo teste F.

As quantidades de nutrientes perdidos via solo erodido (sedimento) não diferiram nas duas adubações (Tabela 4), apesar das quantidades de todos os nutrientes adicionados, exceto o Ca, terem sido superiores na adubação orgânica (Tabela 2). De fato, as perdas de Ca, Mg, S, Zn e Cu dissolvidos na água do escoamento superficial foram, inclusive, menores no tratamento CB. O aumento na concentração de nutrientes na água e no solo perdido foi compensado pela redução nas quantidades totais de água e solo perdidos (Tabela 3). No entanto, é preciso considerar que perdas significativas de nutrientes, principalmente COT, N, K, Ca e S, ocorreram e contribuem para o empobrecimento do solo e a eutrofização de cursos d'água em áreas mineradas. Dessa forma, estratégias de reposição de nutrientes devem ser adotadas, assim como maior controle dos processos erosivos.

Estudos que avaliam perdas de água, solo e nutrientes em áreas mineradas em recuperação com forrageiras são escassos. No entanto, alguns estudos têm avaliado as perdas de solo em áreas não mineradas. Bono et al. (1996) encontraram perdas de solo variando de 6,8 a 18 t/ha ano em Latossolo e de 24,4 a 39,7 t/ha ano em Cambissolo em pastagens de diferentes espécies de gramíneas e formas de preparo do solo e de plantio, avaliados durante dois anos. Silva et al. (2005) avaliaram as perdas de água, solo e nutrientes durante cinco anos em dois tipos de solos

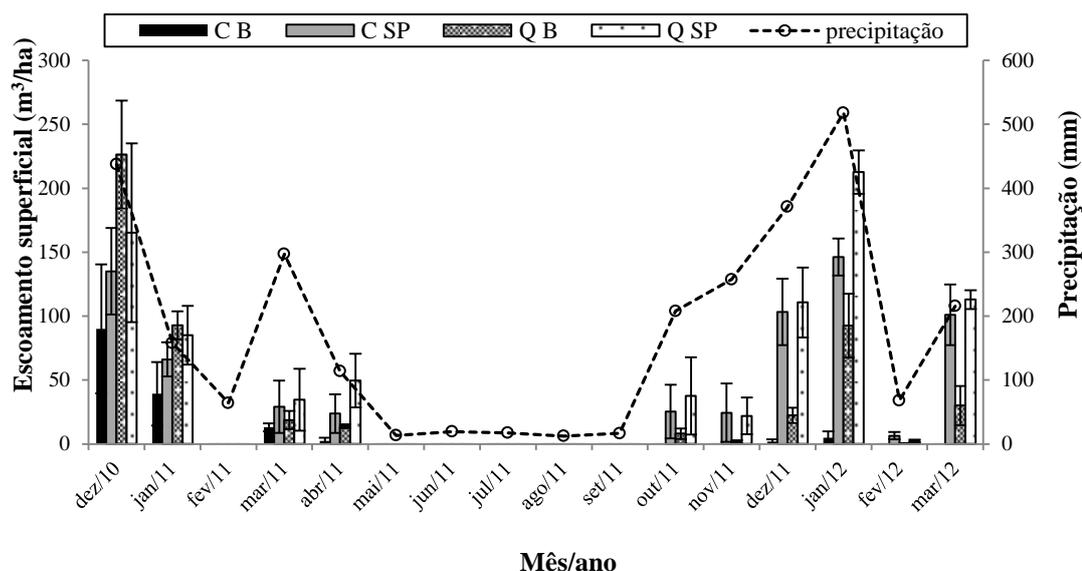


Figura 5: Média das perdas totais mensais de água por escoamento superficial e precipitação mensal, durante o período de dezembro de 2010 a março de 2012, em áreas em recuperação após mineração de bauxita cobertas com braquiária e sem cobertura do solo, adubadas com cama de aviário e adubação química. CB – braquiária adubada com cama de aviário; CSP – sem cobertura do solo adubado com cama de aviário; QB – braquiária com adubação química do solo; QSP - sem cobertura do solo com adubação química. Barras verticais indicam o erro padrão (n=3).

Tabela 4: Médias dos totais de nutrientes e de carbono orgânico total do solo (COT) perdidos na água e no solo por escoamento superficial, no período de dezembro de 2010 a março de 2012, em áreas em recuperação após mineração de bauxita, cobertas com braquiária e sem cobertura do solo, adubadas com cama de aviário e adubação química.

Ad.	Cob. Solo	pH	COT	N	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	S	Fe	Mn	Zn	Cu
Perdas via água													
		t/ha		g/ha			kg/ha					g/ha	
C	B	7,42 ^{Aa}	nd	142,47 ^{Ab}	11,98 ^{Ab}	4,51 ^{Ab}	3,88 ^{Bb}	0,40 ^{Bb}	2,53 ^{Bb}	0,32 ^{Ab}	3,31 ^{Ab}	28,43 ^{Bb}	12,09 ^{Bb}
	SP	7,08 ^{Bb}	nd	323,35 ^{Aa}	33,07 ^{Aa}	7,03 ^{Aa}	19,66 ^{Aa}	1,50 ^{Aa}	11,82 ^{Aa}	0,83 ^{Aa}	9,88 ^{Aa}	101,19 ^{Aa}	43,00 ^{Aa}
Q	B	7,19 ^{Ba}	nd	212,72 ^{Aa}	12,92 ^{Aa}	6,56 ^{Aa}	15,89 ^{Aa}	1,37 ^{Aa}	9,87 ^{Aa}	0,41 ^{Ab}	7,73 ^{Ab}	71,93 ^{Ab}	30,57 ^{Ab}
	SP	7,18 ^{Aa}	nd	380,64 ^{Aa}	15,26 ^{Aa}	7,03 ^{Aa}	21,46 ^{Aa}	2,05 ^{Aa}	11,77 ^{Aa}	1,26 ^{Aa}	12,19 ^{Aa}	118,51 ^{Aa}	49,12 ^{Aa}
Perdas via solo													
		t/ha		g/ha			kg/ha					g/ha	
C	B	7,95 ^{Aa}	0,37 ^{Ab}	28,75 ^{Ab}	1,12 ^{Aa}	20,79 ^{Aa}	56,41 ^{Aa}	4,82 ^{Ab}	19,21 ^{Aa}	0,97 ^{Ab}	0,92 ^{Aa}	0,40 ^{Aa}	96,94 ^{Aa}
	SP	7,54 ^{Bb}	1,54 ^{Aa}	117,87 ^{Aa}	3,74 ^{Aa}	6,71 ^{Aa}	71,08 ^{Aa}	10,82 ^{Aa}	0,81 ^{Ab}	7,90 ^{Aa}	2,49 ^{Aa}	1,29 ^{Aa}	53,20 ^{Aa}
Q	B	8,08 ^{Aa}	0,68 ^{Aa}	39,48 ^{Aa}	1,12 ^{Ab}	15,06 ^{Aa}	79,23 ^{Aa}	5,46 ^{Ab}	13,03 ^{Aa}	2,01 ^{Aa}	1,15 ^{Aa}	0,23 ^{Aa}	61,44 ^{Aa}
	SP	7,86 ^{Ab}	1,43 ^{Aa}	99,47 ^{Aa}	6,34 ^{Aa}	9,15 ^{Aa}	94,55 ^{Aa}	10,89 ^{Aa}	1,29 ^{Ab}	5,33 ^{Aa}	2,11 ^{Aa}	0,70 ^{Aa}	51,25 ^{Aa}

Ad. – tipo de adubação; Cob. Solo – tipo de cobertura do solo; C- cama de aviário; Q – adubação química; B – braquiária; SP – sem planta de cobertura do solo; nd = não determinado. Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro de cada tipo de cobertura do solo, e minúscula dentro de cada tipo de adubação, não diferem a 10 % pelo teste F.

(Latossolo e Cambissolo) que receberam aração e gradagem e foram mantidos sem plantas no município de Lavras, MG. Os autores observaram perdas médias anuais de solo de 205,65 e 14,90 t/ha, e de 3.710,4 e 1.140,8 m³/ha de água para o Cambissolo e o Latossolo, respectivamente. Quanto aos nutrientes no sedimento perdido por erosão, os autores encontraram perdas totais durante cinco anos de 25,0; 3,7; 3,9 e 26,9 kg/ha para Ca, Mg, P e K, respectivamente, e de 14,4 t/ha para COT.

A adubação orgânica em áreas degradadas pode trazer benefícios no processo de recuperação devido às melhorias das condições do solo para o desenvolvimento das plantas, como maior disponibilidade de nutrientes, aumento da CTC, melhor agregação, maior retenção de água e aumento do carbono do solo com consequente aumento da atividade microbiana, dentre outros (Favaretto et al., 2000; Carneiro et al., 2008). Desta forma, a adubação orgânica complementar com cama de aviário, além de melhorar condições físicas do solo que favorecem a retenção e infiltração de água, contribuiu significativamente para a maior produção de biomassa da braquiária (Figuras 3), permitindo maior e mais rápida cobertura do solo, impedindo o impacto direto das gotas de chuva e servindo como barreira ao escoamento superficial da água e arraste de solo.

4. CONCLUSÕES

A adubação complementar com cama de aviário aumenta a produção de matéria seca da *Brachiaria brizantha* cv. Piatã, mas não aumenta a do estilosantes cv. Campo Grande.

As quantidades de nutrientes extraídos por unidade de área são maiores na adubação complementar com cama de aviário. Em média, a braquiária apresenta maior extração de nutrientes por unidade de área do que o estilosantes, exceto Ca e Fe. Nas condições que este estudo foi realizado, o estilosantes cv. Campo Grande não se estabelece no consórcio com a braquiária demandando melhores estudos no estabelecimento do consórcio leguminosa e gramínea em áreas em recuperação após mineração de bauxita.

A adubação orgânica reduz as perdas de água e solo por escoamento superficial em relação à adubação química, principalmente em áreas com braquiária. Em geral, as perdas de nutrientes são equivalentes entre as adubações orgânica e

química, sendo que as maiores perdas ocorrem para carbono orgânico total, N, K, Ca e S.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, A. P. A.; RESENDE, J. R.; OLIVEIRA FILHO, L. G.; ARANTES, L. R. T.; ARANTES, S. E. T.. Crescimento de uma pastagem de capim braquiário (*Brachiaria brizantha* cv. marandu) irrigada e manejada intensivamente. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA. 41. Campo Grande. **Anais ...** Campo Grande: SBZ, 2004. (CD ROM)

ANDRADE, C. M. S.; CARNEIRO, J. C.; VALENTIM, J. F. et al. Efeito do sombreamento sobre as taxas de acumulação de matéria seca de quatro gramíneas forrageiras. In: Reunião anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 39, 2002, Recife. **Anais...** Recife: SBZ, 2002. (CD-ROM).

BARCELLOS, A. O.; RAMOS, A. K. B.; VILELA, L.; MARTHA JUNIOR, G. B. Sustentabilidade da produção animal baseada em pastagens consorciadas e no emprego de leguminosas exclusivas, na forma de banco de proteína, nos trópicos brasileiros. **R. Bras. Zootec.**, 37: 51-67, 2008

BARNABÉ, M. C.; ROSA, B.; LOPES, E. L.; ROCHA, G. P.; FREITAS, K. R.; PINHEIRO, E. P. Produção e composição químico-bromatológica da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu adubada com dejetos líquidos de suínos. **Ci. Anim. Bras.**, 8(3): 435-446, 2007.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C., TEIXEIRA, J. P. F., FURLANI, P. R., GALLO, J. P. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: IAC, 1983. 48 p. (Boletim Técnico, 78).

BONO, J. A. M.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; EVANGELISTA, A. R.; CARVALHO, M. M.; SILVA, M. L. N. Cobertura vegetal e perdas de solo por erosão em diversos sistemas de melhoramento de pastagens nativas. **Past. Trop.**, 18(2): 2-8, 1996.

CANTARUTTI, R. B.; BODDEY, R. M. Transferência de nitrogênio das leguminosas para as gramíneas. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUÇÃO ANIMAL EM PASTEJO, 1997, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 1997. p. 431-446.

CARNEIRO, M. A. C.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; SOARES, A. L. L. Carbono orgânico, nitrogênio total, biomassa e atividade microbiana do solo em duas cronossequências de reabilitação após a mineração de bauxita. **R. Bras. Ci. Solo**, 32: 621-632, 2008.

CASTRO, C. R. T.; GARCIA, R.; CARVALHO, M. M.; COUTO, L. Produção forrageira de gramíneas cultivadas sob luminosidade reduzida. **Rev. Bras. Zoot.**, 28(5): 919-927, 1999.

COSTA, K. A. P.; OLIVEIRA, I. P.; SEVERIANO, E. C.; SAMPAIO, F. M. T.; CARRIJO, M. S.; RODRIGUES, C. R. Extração de nutrientes pela fitomassa de

cultivares de *Brachiaria brizantha* sob doses de nitrogênio. **Ci. Anim. Bras.**, 11(2): 307-314, 2010.

DURIGON, R.; CERETTA, C. A.; BASSO, C. J.; BARCELLOS, L. A. R.; PAVINATO, P. S. Produção de forragem em pastagem natural com o uso de esterco líquido de suínos. **R. Bras. Ci. Solo**, 26(4): 983-992, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Cultivo e uso de estilosantes-campo-grande**. Campo Grande: EMBRAPA, 2007. 10 p. (Comunicado Técnico, 105).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212 p.

EUCLIDES, V. P. B.; MACEDO, M. C. M.; VALLE, C. B.; BARBOSA, R. A.; GONÇALVES, W. V. Produção de forragem e características da estrutura do dossel de cultivares de *Brachiaria brizantha* sob pastejo. **Pesq. Agropec. Bras.**, 43(12): 1805-1812, 2008.

FAVARETTO, N.; MORAES, A.; MOTTA, A. C.; PREVEDELLO, B. M. S. Efeito da revegetação e da adubação de áreas degradada na fertilidade do solo e nas características da palhada. **Pesq. Agrop. Bras.**, 35: 289-297, 2000.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ci. Agrotec.**, 35(6): 1039-1042, 2011.

FRANCO, A. M. P. **Erosão em entressulcos e qualidade física de solos construídos após mineração de carvão**. Porto Alegre: UFRGS, 2010. 95 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

KEMPERS, A. J.; ZWEERS, A. Ammonium determination in soil extracts by the salicylate methods. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, 17: 715-723, 1986.

OLIVEIRA, S. B.; CAIONE, G.; CAMARGO, M. F.; OLIVEIRA, A. N. B.; SANTANA, L. Fontes de fósforo no estabelecimento e produtividade de forrageiras na região de Alta Floresta – MT. **Gl. Sci. Technol.**, 5(1): 1-10, 2012.

PACIULLO, D. S. C.; AROEIRA, L. J. M.; ALVIM, M. J.; CARVALHO, M. M. Características produtivas e qualitativas de pastagem de braquiária em monocultivo e consorciada com estilosantes. **Pesq. Agropec. Bras.**, 38(3): 421-426, 2003.

PARROTA, J. A.; KNOWLES, O. H. Restoring tropical forests on lands mined for bauxite: Examples from the Brazilian Amazon. **Ecol. Eng.**, 17:219-239, 2001.

PRIMAVESI, A. C.; PRIMAVESI, O.; CORRÊA, L. A.; SILVA, A.G.; CANTARELLA, H. Nutrientes na fitomassa de capim-marandu em função de fontes e doses de nitrogênio. **Ci. Agrotec.**, 30(3): 562-568, 2006.

SCHUNKE, R. M.; SILVA, J. M. **Estilosantes Campo Grande consorciado com braquiária contribui para a sustentabilidade da pastagem**. Campo Grande: EMBRAPA, 2003. 5p. (Comunicado Técnico, 87).

SILVA, J. O.; CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; ROCHA, F. A. Capacidade de troca catiônica radicular de gramíneas e leguminosas forrageiras na absorção de cátions. **Educ. Tecnol. Cult.**, 6: 60-64, 2009.

SILVA, A. A. **Potencialidade da recuperação de pastagem de *Brachiaria decumbens* fertilizada com cama de aviário e fontes minerais**. Uberlândia: UFU, 2005. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Veterinárias) – Universidade Federal de Uberlândia.

SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; LIMA, J. M.; AVANZI, J. C.; FERREIRA, M. M. Perdas de solo, água, nutrientes e carbono orgânico em Cambissolo e Latossolo sob chuva natural. **Pesq. Agropec. Bras.**, 40 (12): 1223-1230, 2005.

VOLPE, E.; MARCHETTI, M. E.; MACEDO, M. C. M.; ROSA JUNIOR, E. J. Renovação de pastagem degradada com calagem, adubação e leguminosa consorciada em Neossolo Quartzarênico. **Acta Sci. Agron.**, 30(1): 131-138, 2008.

YANG, J. E.; SLOGLEY, E. O. SCHAFF, B. E.; KIM, J. J. A. Simple spectrophotometric determination of nitrate in water, resin and soil extracts. **Soil Sci. Am. J.**, 62: 1108-1115, 1998.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**, 19: 1467-1476, 1988.

Capítulo II

ESTABILIDADE E ATRIBUTOS ORGÂNICOS DE AGREGADOS DO SOLO EM ÁREA PRÉ E PÓS-MINERAÇÃO DE BAUXITA EM RECUPERAÇÃO COM FORRAGEIRAS

RESUMO

A matéria orgânica do solo (MOS) é um dos principais agentes de formação e estabilização de agregados, e a diminuição de seu conteúdo é uma das maiores causas de deterioração da estrutura do solo. A agregação está relacionada a importantes processos no solo e mudanças no uso, no manejo ou distúrbios, como os causados pela mineração, que alteram a MOS e a estabilidade dos agregados influenciam a qualidade do solo. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da mineração e do uso do solo pré-mineração e de diferentes tipos de adubação e forrageiras sobre a estabilidade e os atributos orgânicos de agregados do solo de área em recuperação após mineração de bauxita. Realizaram-se amostragens de solo para avaliação da distribuição e índices de estabilidade de agregados (DMP e DMG) e dos atributos orgânicos carbono orgânico total (COT), carbono orgânico lábil (COL), nitrogênio total (NT), abundância natural do ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$), relação C/N e do índice de manejo de carbono (IMC) nas frações de agregados em áreas: (i) antes da mineração em área de mata nativa (MN) e pastagem (P-PRE); (ii) seis meses pós-reconfiguração da área minerada (POS-R); (iii) 16 meses após a aplicação dos tratamentos de recuperação com forrageiras (B - *Brachiaria brizantha* cv. Piatã – braquiária; E - estilosantes cv. Campo Grande e; SP - sem planta) e com diferentes tipos de adubação (P – padrão da empresa; C – adubação complementar com cama de aviário; Q – adubação química complementar; C+Q – adubação complementar com cama de aviário + química). A mineração não afetou o DMP, porém aumentou o DMG em relação à P-PRE. De modo geral, a MN e a P-PRE não diferiram no teor de COT e NT sendo superiores à POS-R, porém o COL e o IMC decresceram no sentido MN>P-PRE>POS-R em todas as classes de agregados. Apenas a adubação Q aumentou o DMG em relação à P, e não houve efeito das forrageiras sobre o DMP e DMG. De modo geral, a braquiária (B) e o estilosantes (E) aumentaram o COT, o NT, o COL e o IMC em todas as classes de agregados, porém a B só diferiu da parcela SP quanto ao COL e o IMC nas classes maiores que 0,5 mm. O efeito da adubação foi variado sendo que, em geral, a adubação C e Q isoladas apresentaram melhores resultados. Não houve efeito dos tratamentos sobre a relação C/N e a $\delta^{13}\text{C}$. Na análise conjunta dos dados, foram encontrados dois grupos de áreas similares: um contendo as áreas pré-mineração e outro contendo as áreas com 16 meses após aplicação dos tratamentos e a área pós-reconfiguração. Conclui-se que após 16 meses de recuperação, as forrageiras melhoram os atributos orgânicos dos agregados, principalmente com o uso do estilosantes, e que a adubação com cama de aviário isolada é o tratamento que apresenta diferenças mais significativas. No entanto, os tratamentos não afetam a distribuição e estabilidade dos agregados.

Palavras-chave: estrutura do solo, matéria orgânica do solo, adubação

1. INTRODUÇÃO

A agregação e estabilidade dos agregados influenciam importantes processos no solo como aeração, infiltração de água, susceptibilidade à erosão, penetração de raízes, movimentação e disponibilidade de nutrientes, dentre outros (Abiven et al., 2009; Santos et al., 2012). Mudanças no uso e no manejo do solo ou distúrbios que causem alterações nos agregados e sua estabilidade influenciam diretamente a qualidade do solo e sua capacidade de suportar o crescimento das plantas (Castro Filho et al., 1998; Zhou et al., 2012).

A matéria orgânica do solo (MOS) é um dos principais agentes de formação e estabilização de agregados do solo, e a diminuição de seu conteúdo é uma das maiores causas de deterioração da estrutura do solo (John et al., 2005). De forma recíproca, alterações no uso e a adoção de práticas de manejo que promovam a quebra de agregados, expõem a MOS à ação microbiana resultando em diminuição do C orgânico do solo (Matos et al., 2008).

Dentre os componentes da MOS, as frações mais lábeis caracterizam-se por serem mais acessíveis à ação microbiana e, dessa forma, são mais dinâmicas e podem responder rapidamente às mudanças no ambiente (Haynes, 2000; Passos et al., 2007). Assim, o carbono orgânico lábil (COL) pode ser um indicador sensível da qualidade do solo, permitindo a detecção de alterações causadas pelo uso e manejo do solo, principalmente em curto período (Zhang et al., 2007).

O nitrogênio (N) é um nutriente com baixa disponibilidade no solo que, somada à grande demanda por parte dos vegetais, faz com que ele seja um dos nutrientes mais limitantes da produtividade da maioria das culturas (Barker e Bryson, 2006). Essa baixa disponibilidade é decorrente do fato de que 95 % ou mais do N do solo encontra-se na forma orgânica (Siqueira, 1993). Assim, tendo em vista que os agregados desempenham papel relevante na proteção e na dinâmica da MOS, eles também participam diretamente da disponibilidade de N para as plantas.

As propriedades físicas, químicas e biológicas do solo são profundamente alteradas pelas atividades de remoção e inversão das camadas superficiais do solo e compactação provocada pelo trânsito de máquinas durante a mineração de bauxita e reconfiguração da área (Shrestha e Lal, 2008). Solos minerados apresentam maior densidade, maior presença de cascalho e rocha, menor estruturação, menor porosidade, menor capacidade de retenção de água, menor taxa de infiltração e menores teores de MOS do que solos não perturbados (Thurman e Sencindiver 1986;

Shukla et al., 2004; Lorenz e Lal, 2007; Shrestha e Lal, 2008). Tais restrições físicas precisam ser mensuradas, corrigidas e monitoradas para não limitarem a revegetação na área minerada.

A adubação é uma importante etapa na recuperação de áreas mineradas gerando melhoria nas condições físicas e químicas do solo, especialmente a adubação orgânica, permitindo o restabelecimento de culturas agrícolas e forrageiras sobre essas áreas. A adubação orgânica combinada com a mineral permitiu melhor crescimento da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu sobre rejeitos de mineração de quartzito (Amaral et al., 2012). Rassol et al. (2008) e Yu et al. (2012) também observaram efeitos positivos da adubação orgânica, que aumentou a agregação do solo e o teor de COT associado ao agregados.

As plantas de cobertura, em virtude do seu sistema radicular que, ao ser decomposto, além de liberar nutrientes ainda contribuem para a formação da matéria orgânica do solo, favorecem intensamente o estado de agregação do solo (Souza et al., 2012; Zhou et al., 2012). Quanto maior o teor de matéria orgânica no solo, maior será a organização das partículas em estruturas mais complexas, ou seja, melhor será a sua estruturação (Mielniczuk et al., 2003). Portanto, plantas de cobertura e formas de manejo que promovam o maior aporte de compostos orgânicos ao solo tendem a formar agregados maiores e mais estáveis.

Assim, o presente estudo teve como objetivos avaliar os efeitos de diferentes tipos de adubação e forrageiras sobre a estabilidade e os atributos orgânicos de agregados do solo de área em recuperação após mineração de bauxita.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em condições de campo em propriedade localizada no município de São Sebastião da Vargem Alegre, na Zona da Mata de Minas Gerais, em área onde houve extração de bauxita sob concessão da Companhia Brasileira de Alumínio – Votorantim Metais. O solo dominante na região é o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico.

Após o processo de lavra, a área foi reconfigurada, o que consistiu nas seguintes operações: o subsolo exposto durante a lavra foi descompactado com subsolador equipado com hastes de 0,6 m de comprimento, espaçadas 0,4 m, tracionado por trator de esteira D6. Em seguida, o solo decapeado (horizontes A e B

que se encontravam acima do minério e que foram removidos no processo de lavra) e que estava amontoado em leiras (durante 15 meses) foi espalhado na área, numa camada de 0,4 a 0,6 m, com o auxílio de um trator de esteira. Novamente o terreno foi descompactado com subsolador equipado com hastes de 0,6 m de comprimento, espaçadas 0,4 m, tracionado por trator de esteira D6, com uma passada paralela ao declive do terreno, seguida de uma passada perpendicular. Finalmente, terraços em nível foram construídos, distribuídos ao longo da pendente do terreno.

O experimento de recuperação da área minerada foi instalado seis meses após a reconfiguração, utilizando o delineamento em blocos ao acaso, no esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. Os blocos experimentais foram alocados entre os terraços em nível. As parcelas mediam 33 x 15 m e receberam os tratamentos com adubação: P – adubação padrão utilizada pela Empresa com 2,0 t/ha de calcário dolomítico e 30,0 t/ha de cama de aviário (*in natura*, com aproximadamente 27 % de umidade), aplicados quatro meses antes da instalação do experimento; C – adubação orgânica complementar à adubação padrão (30 t/ha (base seca) de cama de aviário); Q - adubação química complementar à adubação padrão (3 t/ha de calcário dolomítico com 80 % de PRNT e 1,5 t/ha de fosfato natural reativo Bayóvar); C+Q – adubação orgânica e química combinadas complementares à adubação padrão. As fontes e as quantidades de nutrientes adicionados em cada tratamento complementar encontram-se na Tabela 1.

As subparcelas mediam 15 x 7 m, com uma área útil de 48 m², sendo separadas por corredores de um metro de largura. Os tratamentos foram: SP - sem planta, mantendo a área limpa com aplicação de herbicida quando necessário; B – semeadura de braquiária (50 kg/ha de sementes viáveis de *Brachiaria brizantha*, cultivar Piatã); E – semeadura de estilosantes (cultivar Campo Grande, que é uma mistura de sementes de duas espécies: 80 % de *Stylosanthes capitata* e 20 % de *Stylosanthes macrocephala*, com 5 kg/ha de sementes viáveis); B+E – consórcio braquiária-estilosantes (25 kg/ha de sementes viáveis de braquiária e 2,5 kg/ha de sementes viáveis de estilosantes).

A cama de aviário e o calcário foram aplicados em área total e incorporados na camada de 0-15 cm, 30 dias antes da semeadura. O fosfato natural reativo foi aplicado no fundo do sulco de semeadura. As sementes de braquiária ou estilosantes foram semeadas em 01/12/2010, em sulcos de 0,02 m de profundidade e espaçados 0,25 m, dispostos perpendicularmente à pendente do terreno. No tratamento com

consórcio braquiária-estilosantes, semeou-se uma linha de braquiária intercalada com uma de estilosantes.

Tabela 1: Fontes e quantidades totais de nutrientes adicionados na implantação das forrageiras braquiária e estilosantes com diferentes tipos de adubação em área após mineração de bauxita, na camada de 0-20 cm do solo

Tipo de Adubação	Fonte	MS	N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Fe	Cu	Zn
		t/ha	-----kg/ha-----									
<i>Orgânica</i>	CA	30,0	597,3	271,1	625,8	145,3	426,7	106,1	11,0	244,1	1,6	10,1
	Calcário	3,0	-	-	-	851,2	217,1	-	-	-	-	-
<i>Orgânica + Química</i>	CA	30,0	597,3	271,1	625,8	426,7	106,1	145,3	11,0	244,1	1,6	10,1
	FNR	1,5	9,9	195,1	1,6	483,0	5,3	20,3	0,1	0,1	0,0	0,1
	Total	-	607,2	466,2	627,4	1.760,8	328,5	165,6	11,1	244,2	1,6	10,2
<i>Química</i>	Calcário	3,0	-	-	-	851,2	217,1	-	-	-	-	-
	FNR	1,5	9,9	195,1	1,6	483,0	5,3	20,3	0,1	0,1	0,0	0,1
	Total	-	9,9	195,1	1,6	1.334,2	222,3	20,3	0,1	0,1	0,0	0,1
<i>Padrão</i>	Adubação padrão da Empresa¹											

CA = cama de aviário; FNR = fosfato natural reativo; MS = massa seca.

¹2,0 t/ha de calcário dolomítico e 30,0 t/ha de cama de aviário *in natura* (27 % de umidade) aplicados quatro meses antes da instalação do experimento.

A massa vegetal produzida pela parte aérea das forrageiras foi colhida e retirada das parcelas, simulando condição de pastejo. Os cortes foram realizados após 105, 175, 378 e 470 dias após a semeadura, utilizando como critério para escolha do momento do corte o início do florescimento da braquiária. Desta forma, a contribuição das forrageiras para a agregação e os atributos orgânicos do solo se refere essencialmente ao efeito de raízes (ciclagem e rizodeposição).

Realizaram-se amostragens de solo para avaliação da estabilidade de agregados e dos atributos orgânicos nos agregados nas seguintes condições: i) pré-mineração, em uma área coberta com pastagem (*Braquiária brizantha* cv. Piatã, sem uso de corretivos e fertilizantes) e em uma área adjacente coberta com mata nativa (estádio de regeneração secundário), que serviram como referência do estado do solo na sua condição original, antes que se iniciasse o processo de lavra; ii) seis meses pós-reconfiguração da área minerada (antes da aplicação dos tratamentos), que serviu para avaliar o impacto da mineração e como referência para o processo de

recuperação; iii) 16 meses após a aplicação dos tratamentos de recuperação com forrageiras na área minerada. Amostras deformadas e indeformadas de solo na camada de 0-20 cm também foram coletadas para caracterização química e física (Tabela 2) dessas áreas, conforme EMBRAPA (1997).

Nas áreas antes da mineração (mata e pastagem) e após a reconfiguração, foram demarcados três blocos amostrais de 25 x 50 m em cada área, distribuídos ao longo do declive do terreno, onde foram abertas trincheiras de 60 x 50 x 20 cm (uma por bloco), e no experimento após 16 meses da aplicação dos tratamentos, as trincheiras foram abertas nas subparcelas (uma por subparcela). Em cada trincheira foram coletados, na profundidade de 0-20 cm, quatro blocos de solo (um de cada lado da trincheira) nas dimensões de aproximadamente 15 x 15 x 20 cm, a fim de manter a estrutura do solo. As amostras de solo de cada trincheira foram combinadas em uma amostra composta, destorroadas manualmente na umidade de campo e passadas em peneira de 8,0 mm.

A separação dos agregados em classes de tamanho foi determinada por via úmida com os agregados que passaram pela peneira de 8 mm, quantificando-se os agregados estáveis em água retidos nas peneiras de malha de 2,00, 1,00, 0,5, 0,25 e 0,106 mm, obtendo-se seis classes de agregados: 8,00-2,00; 2,00-1,00; 1,00-0,50; 0,50-0,25; 0,25-0,106 e <0,106 mm. Foi utilizado um oscilador mecânico tipo Yoder, de frequência igual a 26 ciclos/min e 4,0 cm de amplitude vertical, durante 15 min (Kemper e Chepil, 1965).

Após a separação, os agregados foram secos em estufa (60 °C) e a proporção de cada classe foi determinada em relação ao total, e procedeu-se o cálculo dos índices diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG), por meio das seguintes fórmulas:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot x_i)$$

$$DMG = 10^{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot \log x_i)}$$

em que:

w_i = é a proporção de agregados nas diferentes classes i ;

x_i = é o diâmetro médio da classe de agregado i .

Tabela 2: Características físicas e químicas nas camadas de 0-20 cm de solos com mata nativa e pastagem pré-mineração, com seis meses pós-reconfiguração de área minerada e com 16 meses após implantação de forrageiras com diferentes adubações em área em recuperação após mineração de bauxita

Atributo	Unidade	Mata	PrÉM	PósM	Adubação Padrão Empresa			Cama de aviário			Química			Cama de aviário + Química		
					B	E	SP	B	E	SP	B	E	SP	B	E	SP
pH		4,68	4,42	5,23	5,97	6,14	6,01	6,05	5,67	5,75	6,25	5,80	6,25	6,43	6,41	6,43
COT	dag/kg	5,34	4,52	1,45	1,22	1,22	1,32	1,44	1,69	1,64	1,51	1,77	1,33	1,45	1,38	1,35
NT	dag/kg	0,34	0,31	0,09	0,10	0,09	0,10	0,13	0,13	0,13	0,11	0,11	0,10	0,11	0,09	0,10
P	mg/dm ³	1,92	0,97	1,05	7,43	2,54	8,31	9,25	12,61	9,51	13,21	9,91	68,86	27,23	21,26	56,25
K ⁺	cmol _c /dm ³	0,15	0,09	0,07	0,08	0,07	0,08	0,12	0,11	0,06	0,10	0,13	0,04	0,09	0,12	0,05
Ca ²⁺	cmol _c /dm ³	0,20	0,05	0,37	0,75	1,78	1,73	1,78	1,04	1,77	2,27	1,65	2,22	2,53	2,69	2,37
Mg ²⁺	cmol _c /dm ³	0,02	0,09	0,13	0,27	0,65	0,41	0,68	0,40	0,62	0,73	0,55	0,71	0,82	0,87	0,83
S	mg/dm ³	-	-	4,58	13,38	11,12	21,05	9,52	6,92	9,74	12,82	11,88	21,26	15,79	15,31	15,06
Mn	mg/dm ³	8,49	6,91	5,04	4,29	3,25	6,63	6,10	5,57	5,93	3,17	3,66	3,52	8,50	8,55	9,12
Fe	mg/dm ³	262,77	334,8	174,91	54,65	51,11	52,03	47,32	72,03	62,42	51,48	80,71	48,25	40,67	46,10	42,31
Cu	mg/dm ³	0,30	0,23	0,60	0,07	0,04	0,17	0,15	0,18	0,13	0,08	0,09	0,18	0,08	0,13	0,07
Zn	mg/dm ³	11,09	1,10	1,25	2,55	1,31	4,17	4,13	4,37	4,05	1,44	1,40	1,77	6,40	6,09	6,70
Al ³⁺	cmol _c /dm ³	1,42	1,57	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H + Al	cmol _c /dm ³	14,03	12,64	3,91	2,55	1,82	2,38	2,72	3,75	3,12	2,46	3,35	2,08	2,39	2,02	1,97
SB	cmol _c /dm ³	0,37	0,23	0,57	1,10	2,50	2,22	2,58	1,55	2,46	3,09	2,33	2,97	3,44	3,68	3,25
CTC	cmol _c /dm ³	14,40	12,9	4,48	3,64	4,32	4,61	5,30	5,31	5,58	5,55	5,67	5,05	5,84	5,69	5,22
t	cmol _c /dm ³	1,79	1,79	0,67	1,10	2,50	2,22	2,58	1,61	2,46	3,09	2,33	2,97	3,44	3,68	3,25
V	%	2,60	1,73	12,72	29,9	57,6	47,2	48,9	24,8	44,9	55,2	40,9	58,7	60,3	65,1	63,3
m	%	78,74	87,2	14,93	0,00	0,00	0,00	0,00	12,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P-rem	mg/L	5,19	1,06	5,55	3,62	3,66	4,05	3,03	4,69	4,69	3,63	4,06	4,36	4,26	5,84	4,06
Argila	g/kg	480,0	660,0	640,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Silte	g/kg	193,0	147,5	70,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Areia	g/kg	327,0	192,5	290,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ds	kg/dm ³	0,57	0,84	1,25	1,29	1,21	1,40	1,23	1,34	1,26	1,18	1,23	1,16	1,27	1,33	1,27
Macro	dm ³ /dm ³	0,52	0,33	0,32	0,18	0,16	0,18	0,16	0,11	0,13	0,19	0,15	0,19	0,19	0,16	0,17
Micro	dm ³ /dm ³	0,25	0,36	0,25	0,41	0,41	0,35	0,41	0,41	0,43	0,39	0,41	0,40	0,36	0,36	0,38
PT	dm ³ /dm ³	0,77	0,69	0,57	0,59	0,57	0,53	0,57	0,52	0,56	0,58	0,56	0,59	0,55	0,52	0,55

PrÉM = pastagem pré-mineração
PósM = seis meses pós-reconfiguração.
B = braquiária.
E = estilosantes.
B+E = consórcio braquiária + estilosantes.

SP = sem forrageira.
COT = carbono orgânico total.
NT = nitrogênio total.
P-rem = fósforo remanescente.
SB = soma de bases.

CTC = capacidade de troca de cátions a pH 7,0.
t = capacidade de troca de cátions efetiva.
V = saturação por bases.
m = saturação por alumínio.
P-rem = fósforo remanescente.

Ds = densidade do solo.
Macro = macroporosidade.
Micro = microporosidade.
PT = porosidade total.

Os agregados de cada classe foram triturados em almofariz de porcelana e passados em peneira de 0,149 mm para determinação do carbono oxidável com KMnO_4 $0,033 \text{ mol L}^{-1}$ (C orgânico lábil - COL) e quantificados por espectrofotometria, conforme procedimento proposto por Blair et al. (1995) e adaptado para solos tropicais por Shang e Tiessen (1997). O carbono orgânico total (COT), o nitrogênio total (NT) e a abundância natural do isótopo ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) foram determinados em espectrômetro de massas de razão isotópica (ANCA GSL 20-20, Sercon, Crewe, UK). A razão isotópica foi expressa em partes por 1000 (‰) em relação ao padrão Pee Dee Belemnita (PDB), conforme a equação (Bernoux et al., 1998):

$$\delta^{13}\text{C} = \left(\frac{\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \text{ amostra} - \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \text{ padrão}}{\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \text{ padrão}} \right) \times 1000$$

Os valores da relação C/N foram obtidos pelo quociente dos teores de COT e de NT dos agregados. Com os dados de COT, COL e CNL (carbono orgânico não lábil, calculado pela diferença entre COT e COL) calculou-se o índice de manejo de carbono (IMC) (Blair et al., 1995) para cada classe de agregado, utilizando os valores obtidos na área de mata nativa como referência, por meio da seguinte equação:

$$\text{IMC} = (\text{COT}_1/\text{COT}_2) \times [(\text{COL}_1/\text{CNL}_1)/(\text{COL}_2/\text{CNL}_2)] \times 100$$

em que:

COT_1 = Carbono orgânico total na amostra de solo

COT_2 = Carbono orgânico total na amostra de solo referência

COL_1 = Carbono lábil na amostra de solo

CNL_1 = Carbono não lábil na amostra de solo

COL_2 = Carbono lábil na amostra de solo referência

CNL_2 = Carbono não lábil na amostra de solo referência

Os dados obtidos foram submetidos à ANOVA e comparados pelo teste de Tukey a 10 % utilizando o programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2011). Com os dados da primeira (pré-mineração) e segunda amostragem (pós-reconfiguração da área) foram avaliados o efeito da mineração e do uso do solo sobre a agregação e os atributos orgânicos dos agregados, utilizando o delineamento em blocos ao acaso. Estes foram analisados de forma independente dos da terceira amostragem, onde foram avaliados os efeitos dos tipos de plantas de cobertura e dos tipos de adubação sobre a agregação e os atributos orgânicos dos agregados, na recuperação da área

minerada com forrageiras, utilizando o delineamento em blocos ao acaso no esquema de parcelas subdivididas. Nas análises univariadas, as classes de agregados não foram consideradas como um fator, sendo os tratamentos comparados em cada classe de agregado individualmente.

A similaridade entre as áreas pré-mineração, pós-reconfiguração e após 16 meses da aplicação dos tratamentos de recuperação da área minerada foi avaliada por meio de técnicas multivariadas de ordenação (Variáveis Canônicas) e de agrupamento (método de classificação hierárquico de Ligação Média Entre Grupos – UPGMA, tendo como medida de dissimilaridade a distância generalizada de Mahalanobis), com base na análise conjunta das variáveis. O número ótimo de grupos (ponto de corte) foi definido utilizando o método proposto por Mojena (1977). Foram incluídas nas análises, as variáveis COT, COL, NT e $\delta^{13}\text{C}$ de todas as classes de agregados simultaneamente e os índices de estabilidade dos agregados (DMG e DMP), totalizando 22 variáveis. A importância relativa de cada variável para a discriminação dos grupos foi obtida utilizando a estatística S_j proposta por Singh (1981). A possibilidade de exclusão de variáveis redundantes foi avaliada pela alteração no padrão de agrupamento obtido pelo método de otimização de Tocher. Todas as análises multivariadas e os respectivos critérios de significância foram processados utilizando o software GENES (Cruz, 2006).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Efeito da mineração e do uso do solo pré-mineração

3.1.1. Estabilidade e distribuição do tamanho de agregados

Na distribuição das classes de tamanho dos agregados, a classe de 2-8 mm foi a mais representativa, com valores variando de 45,4 % (pastagem pré-mineração) a 56,3 % (pós-reconfiguração) (Tabela 3). Shrestha e Lal (2008) também observaram predominância de agregados na classe de 2-8 mm sob diferentes usos do solo.

Quanto à estabilidade dos agregados, não houve efeito significativo ($p > 0,1$) da mineração e reconfiguração do solo e do uso com pastagem pré-mineração sobre o DMP comparado à mata nativa. No entanto, o DMG foi superior na área reconfigurada após mineração comparado à pastagem pré-mineração, porém sem diferir da área coberta com mata nativa. Uma possível causa da quebra de agregados na pastagem pré-mineração pode estar relacionada ao pisoteio do gado na camada

superficial durante o longo período de pastoreio (> 10 anos). Diferentemente deste trabalho, alterações marcantes na estabilidade de agregados entre usos e manejos do solo foram encontradas por Six et al. (1998), Castro Filho et al. (1998) e Oliveira et al. (2008).

3.1.2. *Atributos orgânicos em agregados do solo*

Os teores de COT e de NT nos agregados da área de pastagem pré-mineração não diferiram da área de mata nativa. No entanto, o processo de mineração e reconfiguração reduziu significativamente os teores de COT e NT (Figura 1). O COL também foi reduzido com a intensificação de usos e distúrbios, seguindo a ordem decrescente: mata > pastagem pré-mineração > área pós-reconfiguração, exceto nas classes de 0,5-1,0 e 1,0-2,0 mm, onde a pastagem foi equivalente à área pós-reconfigurada. Contudo, o IMC, que integra o COT e o COL, se mostrou um indicador sensível ao impacto do uso do solo, separando os três usos (mata>pastagem>pós-reconfiguração) em todas as classes de agregados, exceto na classe de 1,0-2,0 mm. Estes resultados confirmam as alegações de Blair et al (1995) e Dieckow et al. (2005) de que o IMC pode ser um parâmetro útil na avaliação do efeito dos usos e sistemas de manejo sobre a qualidade do solo.

Os agregados do solo com pastagem pré-mineração e do solo pós-reconfiguração apresentaram relação C/N e $\delta^{13}\text{C}$ equivalente aos agregados do solo da mata. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ da área de pastagem deveriam ser maiores (menos negativos) por ser uma área normalmente ocupada por plantas do grupo C₄ (gramíneas). A textura bastante argilosa e o clima relativamente ameno, principalmente no inverno, podem ter contribuído para reduzir as taxas de substituição da MOS antiga (derivada da Mata Atlântica) que precedeu a pastagem, conforme observado por Lima et al. (2008) para solos mais oxídicos e em regiões de maior altitude no Vale do Rio Doce. Além disso, as pastagens da região não são manejadas e normalmente são infestadas por plantas daninhas do grupo C₃, que podem estar contribuindo para tornar a $\delta^{13}\text{C}$ próxima da encontrada na mata nativa. Quanto ao efeito da mineração, não era esperada alterações na $\delta^{13}\text{C}$, uma vez que não há crescimento de plantas quando do armazenamento do solo decaído em leiras durante o processo de mineração e após a reconfiguração.

Tabela 3: Distribuição e índices de estabilidade de agregados (DMP e DMG) na camada de 0-20 cm de solo sob mata nativa, pastagem pré-mineração, pós-reconfiguração, e após 16 meses da implantação de forrageiras com diferentes tipos de adubação na recuperação de área minerada de bauxita.

Tipo de Adubação	Cobertura do Solo	Classes de Agregados (mm)						DMP	DMG
		<0,106	0,106-0,25	0,25-0,50	0,50-1,00	1,00-2,00	2,00-8,00		
		----- % -----						(mm)	(mm)
-	Mata	7,8 ± 2,2*	3,1 ± 0,6	6,6 ± 1,0	13,3 ± 1,2	12,9 ± 1,1	56,2 ± 3,8	3,14 a	1,80 ab
	Pasto Pré-mineração	11,5 ± 3,8	3,9 ± 0,4	8,4 ± 0,8	15,9 ± 1,2	14,9 ± 1,0	45,4 ± 5,2	2,66 a	1,36 b
	Pós-reconfiguração	3,2 ± 0,5	5,1 ± 0,4	6,5 ± 0,9	13,7 ± 0,9	15,1 ± 0,7	56,3 ± 2,9	3,17 a	2,04 a
C	B	5,6 ± 0,5	5,7 ± 0,1	9,2 ± 1,1	18,8 ± 1,3	19,9 ± 0,4	40,8 ± 2,1	2,52	1,39
	E	4,9 ± 1,3	4,0 ± 0,9	8,3 ± 1,8	16,2 ± 0,8	17,3 ± 2,0	49,2 ± 4,9	2,88	1,71
	SP	4,3 ± 1,0	6,6 ± 1,9	10,2 ± 2,4	15,6 ± 1,0	23,9 ± 2,8	39,4 ± 5,0	2,50	1,45
	Média	4,9 ± 0,9	5,5 ± 1,2	9,2 ± 1,7	16,9 ± 1,2	20,4 ± 2,4	43,1 ± 4,5	2,64 A	1,52 AB
C + Q	B	6,7 ± 2,7	3,9 ± 1,2	6,2 ± 2,2	15,3 ± 3,5	18,3 ± 3,7	49,6 ± 5,3	2,90	1,67
	E	5,1 ± 0,4	5,2 ± 0,4	8,3 ± 0,9	15,2 ± 2,1	22,7 ± 5,3	43,5 ± 7,9	2,67	1,56
	SP	4,1 ± 0,8	5,9 ± 0,6	11,3 ± 3,5	13,7 ± 1,9	19,8 ± 2,3	45,2 ± 3,8	2,72	1,56
	Média	5,3 ± 1,6	5,0 ± 0,9	8,6 ± 2,5	14,7 ± 2,3	20,3 ± 3,6	46,1 ± 5,4	2,76 A	1,60 AB
Q	B	5,3 ± 0,7	4,1 ± 0,8	6,6 ± 1,9	17,8 ± 2,0	19,6 ± 2,3	46,5 ± 1,5	2,79	1,62
	E	5,0 ± 0,9	5,4 ± 1,1	8,0 ± 1,5	13,9 ± 3,1	16,6 ± 3,2	51,1 ± 7,9	2,95	1,76
	SP	4,2 ± 0,5	5,1 ± 0,6	8,4 ± 0,6	16,5 ± 2,0	20,0 ± 3,3	45,7 ± 6,2	2,75	1,63
	Média	4,9 ± 0,7	4,9 ± 0,8	7,7 ± 1,4	16,1 ± 2,3	18,8 ± 2,7	47,8 ± 5,3	2,83 A	1,67 A
P	B	5,5 ± 1,5	7,9 ± 0,4	12,4 ± 0,7	17,1 ± 1,3	18,4 ± 1,0	38,6 ± 2,3	2,40	1,26
	E	8,7 ± 1,5	5,7 ± 0,8	8,8 ± 1,1	16,9 ± 0,9	25,4 ± 1,7	34,5 ± 3,9	2,28	1,20
	SP	6,2 ± 2,7	7,8 ± 0,7	11,7 ± 1,1	19,3 ± 2,7	22,0 ± 3,5	33,0 ± 3,4	2,18	1,14
	Média	6,8 ± 1,9	7,1 ± 0,8	± 11,0 ± 1,3	17,7 ± 1,7	22,0 ± 2,7	35,4 ± 3,2	2,29 A	1,20 B

*Médias ± erro padrão da média. C = cama de aviário; Q = adubação química; P = adubação padrão da Empresa; B = braquiária; E = estilantes; SP = sem cobertura do solo; DMG = diâmetro médio geométrico; DMP = diâmetro médio ponderado. Médias de DMG ou DMP seguidas de mesma letra maiúscula, entre adubações, e letra minúscula, entre usos pré-mineração e pós-reconfiguração, não diferem pelo teste Tukey a 10 %.

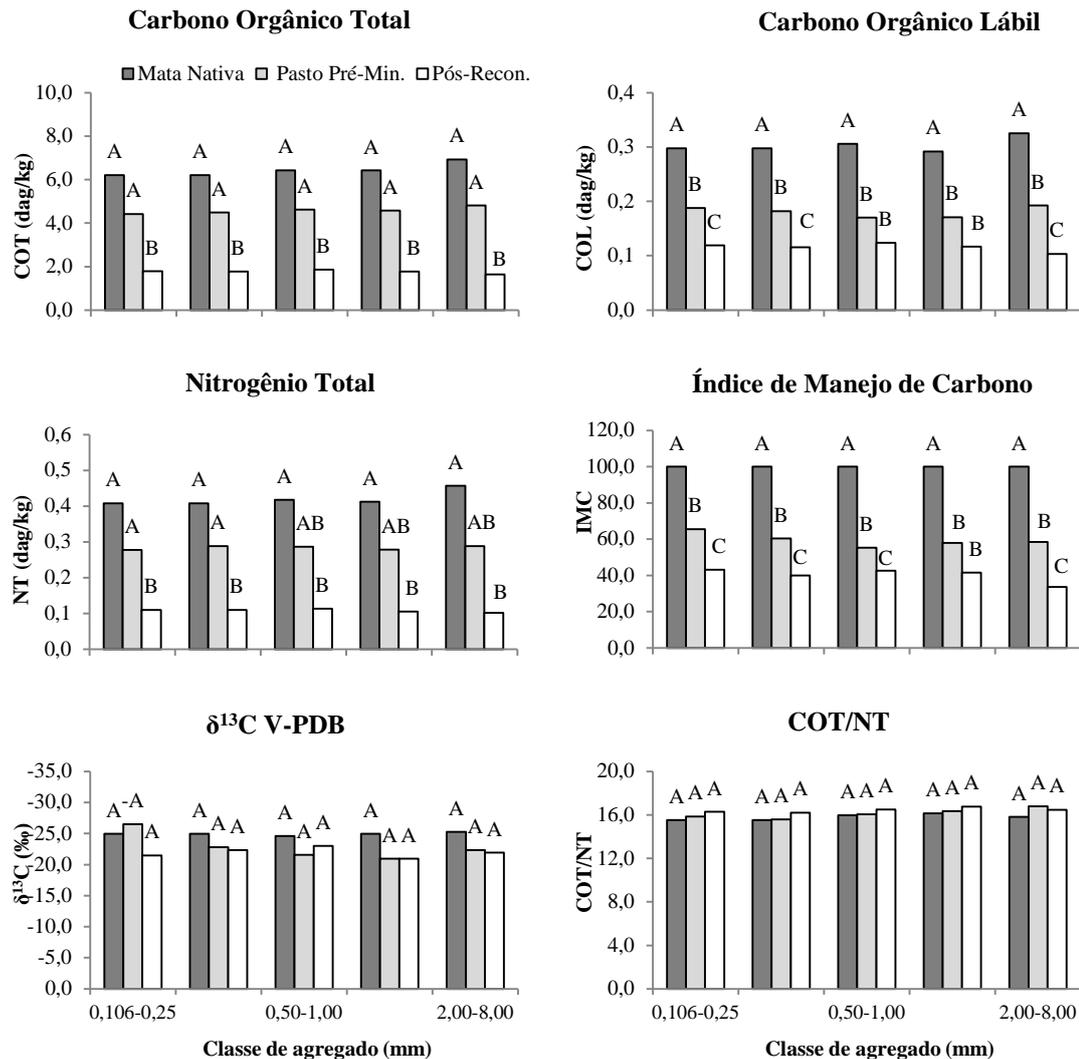


Figura 1: Médias de atributos orgânicos em agregados do solo sob mata nativa, pastagem pré-mineração (Pasto Pré-Min.) e seis meses após reconfiguração de área minerada (Pós-Recon.), na camada de 0 – 20 cm. Médias de usos do solo dentro de cada classe de agregado seguidas de mesma letra maiúscula não diferem pelo teste Tukey a 10 %.

3.2. Efeito dos tipos de adubação e forrageiras na recuperação da área minerada

No tratamento com consórcio braquiária-estilosantes, o estilosantes não foi capaz de se desenvolver, devido ao crescimento inicial lento, não sendo capaz de competir com a braquiária e se estabelecer. Assim, não são apresentados os dados referentes a este tratamento (B+E) por se equivaler ao tratamento com braquiária em monocultivo.

3.2.1. Estabilidade e distribuição do tamanho de agregados

Não houve interação significativa entre os tipos de adubação e as forrageiras sobre o DMP e o DMG após 16 meses de recuperação da área minerada, sendo assim, são discutidos aqui apenas os efeitos médios das adubações e das forrageiras. O DMP não foi alterado pelos tratamentos com adubação e forrageiras ($p > 0,1$) (Tabela 3). Quanto ao DMG, houve aumento apenas com a adubação química complementar (Q) comparada à padrão, não sendo observadas diferenças entre as adubações C e C + Q em relação à P e Q. Segundo Haynes e Naidu (1998) a adubação e correção do solo podem influenciar a agregação do solo indiretamente por aumentarem a produção das culturas e, conseqüentemente, o *input* de MOS ao solo e, também, diretamente por alterarem a composição química da solução do solo, o que pode influenciar os processos de floculação/dispersão das argilas e sua interação com a MOS. De acordo com esses mesmos autores, apesar das controvérsias sobre os efeitos da calagem sobre a agregação do solo, esta prática pode promover a agregação em solos tropicais pelo efeito de cimentação e floculação do CaCO_3 e pela formação de precipitados de polímeros de hidróxidos de Al. Isso poderia ser uma possível explicação para o fato do tratamento Q no presente estudo ter apresentado aumento no DMG em relação ao solo com adubação padrão.

O efeito do aumento na agregação esperado pela adição da cama de aviário não foi confirmado neste estudo. Six et al. (2000) propõem um modelo conceitual de “ciclo de vida” de macroagregados onde estes são formados pela junção de microagregados ao redor de partículas da matéria orgânica recém adicionada devido a produção de agentes ligantes pela atividade microbiana. À medida que a matéria orgânica dentro dos macroagregados é decomposta e transformada em partículas mais finas, estas se inscrutam com as argilas e com os produtos da atividade microbiana para formar novos microagregados dentro dos macroagregados. Com o passar do tempo, os agentes agregantes orgânicos são degradados resultando em perda da estabilidade de macroagregados e liberação dos microagregados para um novo ciclo. Abiven et al. (2009), em uma revisão sobre o efeito da aplicação de compostos orgânicos sobre a agregação do solo, concluem que o tempo para que a aplicação de um composto orgânico possa surtir efeito na agregação do solo pode variar desde semanas a até anos. Assim, no presente estudo a ausência de efeito da adubação orgânica na melhoria da estabilidade de agregados pode estar relacionada

ao curto período de tempo da avaliação (16 meses). Alternativamente, esses dados indicam que a agregação é mais dependente da presença de plantas em crescimento.

3.2.2. Atributos orgânicos em agregados do solo

Não houve interação significativa ($p > 0,1$) entre os tipos de adubação e tipos de forrageiras em nenhum dos atributos orgânicos avaliados, e o efeito dos tipos de adubação e forrageiras foram variados entre classes de agregados e tipo de atributo avaliado. Serão discutidos apenas os efeitos médios dos tratamentos sobre os atributos orgânicos.

Quanto ao efeito das forrageiras, o estilosantes aumentou o teor de COT e NT nos agregados de todas as classes de tamanho em relação às parcelas sem planta (Tabela 4 e 6). No entanto, em geral o estilosantes apresentou efeito equivalente ao da braquiária, que por sua vez teve mesmo efeito da área sem planta. O N é um nutriente muito dinâmico no solo e demandado em grandes quantidades pelas plantas. Grandes perdas de N podem ocorrer por lixiviação, volatilização e erosão, tendo as plantas um papel importante na manutenção do N no sistema. Assim, o estilosantes com sua capacidade de fixação do N_2 atmosférico e a braquiária com seu abundante sistema radicular fasciculado e sua alta demanda e absorção de N, podem contribuir para o aumento ou manutenção do teor de N nos agregados do solo por meio do *turnover* de raízes.

As forrageiras aumentaram o COL e o IMC (Tabelas 4 e 5) em relação às parcelas sem cobertura do solo (SP), principalmente nas classes de agregados maiores que 0,5 mm. O estilosantes foi superior a SP em todas as classes de agregados e a braquiária não diferiu de SP, quanto ao COL e IMC, apenas nas classes menores que 0,5 mm.

Os tipos de adubação e as forrageiras não alteraram a $\delta^{13}C$ e a relação C/N nos agregados, exceto nas classes de 0,5 – 1,0 e 1,0 – 2,0 mm, onde houve adubação com cama de aviário, que apresentou menor relação C/N do que com a adubação padrão (Tabelas 5 e 6).

Comparando-se os teores de COT na área pós-reconfiguração (Figura 1) com os da área após 16 meses de recuperação com forrageiras (Tabela 4), percebe-se que houve diminuição do COT nas parcelas sem cobertura, indicando que a atividade microbiana tem atuado sobre o C velho, nativo no solo, sem que haja novos *inputs*.

Tabela 4: Carbono orgânico total (COT) e carbono orgânico lábil (COL) em agregados do solo, na camada de 0 – 20 cm, após 16 meses da implantação de forrageiras com diferentes tipos de adubação na recuperação de área minerada de bauxita

Tipos de Adubação	Cobertura do Solo				Cobertura do Solo			
	B	E	SP	Média	B	E	SP	Média
----- COT (dag/kg de agregado) -----								
<i>Agregados 2,0 – 8,0 mm</i>								
C	1,48	2,04	1,50	1,67 A	0,14	0,19	0,11	0,15 A
C + Q	1,42	1,53	1,35	1,44 A	0,12	0,13	0,11	0,12 A
Q	1,71	2,23	1,76	1,90 A	0,16	0,17	0,12	0,15 A
P	1,44	1,46	0,95	1,28 A	0,13	0,10	0,08	0,10 A
Média	1,51 ab	1,82 a	1,39 b		0,14 a	0,15 a	0,10 b	
CV (%)		23,05		35,06		24,86		31,90
<i>Agregados 1,0 – 2,0 mm</i>								
C	1,65	2,15	1,66	1,82 A	0,20	0,20	0,13	0,17 A
C + Q	1,55	1,75	1,47	1,59 A	0,14	0,15	0,13	0,14 AB
Q	1,94	2,23	1,75	1,97 A	0,17	0,16	0,13	0,15 AB
P	1,54	1,60	1,11	1,42 A	0,13	0,12	0,09	0,11 B
Média	1,67 ab	1,93 a	1,50 b		0,16 a	0,16 a	0,12 b	
CV (%)		20,94		32,04		24,03		29,38
<i>Agregados 0,5 – 1,0 mm</i>								
C	1,75	2,26	1,72	1,91 A	0,18	0,21	0,14	0,18 A
C + Q	1,68	1,83	1,60	1,70 A	0,16	0,16	0,13	0,15 AB
Q	2,02	2,24	1,78	2,01 A	0,15	0,21	0,13	0,16 AB
P	1,62	1,62	1,09	1,44 A	0,14	0,12	0,08	0,11 B
Média	1,77 ab	1,99 a	1,55 b		0,16 a	0,17 a	0,12 b	
CV (%)		19,12		24,74		21,93		29,81
<i>Agregados 0,25 – 0,5 mm</i>								
C	1,80	2,23	1,72	1,92 AB	0,17	0,21	0,15	0,18 A
C + Q	1,72	1,97	1,63	1,77 AB	0,13	0,18	0,14	0,15 AB
Q	1,89	2,20	1,80	1,97 A	0,16	0,20	0,14	0,17 A
P	1,62	1,57	1,08	1,43 B	0,16	0,11	0,09	0,12 B
Média	1,76 ab	1,99 a	1,56 b		0,16 ab	0,18 a	0,13 b	
CV (%)		18,68		20,67		25,58		20,44
<i>Agregados 0,106 – 0,25 mm</i>								
C	1,95	2,32	1,72	2,00 A	0,20	0,22	0,16	0,19 A
C + Q	1,78	2,03	1,70	1,84 AB	0,18	0,19	0,15	0,17 AB
Q	1,86	2,26	1,76	1,96 A	0,17	0,19	0,14	0,17 AB
P	1,63	1,62	1,11	1,45 B	0,14	0,13	0,09	0,12 B
Média	1,81 ab	2,06 a	1,57 b		0,17 ab	0,18 a	0,14 b	
CV (%)		18,19		19,00		27,86		24,26

C = cama de aviário; Q = adubação química; P = adubação padrão da Empresa; B = braquiária; E = estilosantes; SP = sem cobertura do solo; Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e letra minúscula na linha dentro de cada classe de agregado e cada atributo não diferem pelo teste Tukey a 10 %.

Tabela 5: Abundância natural do isótopo ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) e índice de manejo de carbono (IMC) em agregados do solo, na camada de 0 – 20 cm, após 16 meses da implantação de forrageiras com diferentes tipos de adubação na recuperação de área minerada de bauxita

Tipos de Adubação	Cobertura do Solo				Cobertura do Solo			
	B	E	SP	Média	B	E	SP	Média
----- $\delta^{13}\text{C}$ (%) -----				----- IMC -----				
<i>Agregados 2,0 – 8,0 mm</i>								
C	-19,0	-23,1	-17,8	-19,9 A	46,89	61,15	33,88	47,31 A
C + Q	-22,8	-16,4	-20,8	-20,0 A	36,80	42,39	34,24	37,81 A
Q	-16,9	-20,1	-18,5	-18,5 A	51,79	53,23	38,39	47,81 A
P	-20,6	-18,7	-17,8	-19,0 A	42,22	32,35	24,77	33,11 A
Média	-19,8 a	-19,6 a	-18,7 a		44,43 a	47,28 a	32,82 b	
CV (%)		12,42		15,89		25,53		32,28
<i>Agregados 1,0 – 2,0 mm</i>								
C	-17,7	-19,4	-17,7	-18,3 A	76,37	70,53	45,20	64,03 A
C + Q	-22,1	-19,8	-21,2	-21,0 A	49,93	54,99	45,21	50,05 AB
Q	-18,9	-20,4	-20,2	-19,8 A	61,21	54,62	45,07	53,64 AB
P	-18,9	-21,9	-19,3	-20,0 A	44,66	41,31	32,26	39,41 B
Média	-19,4 a	-20,4 a	-19,6 a		58,04 a	55,36 a	41,94 b	
CV (%)		16,80		15,70		26,61		30,88
<i>Agregados 0,5 – 1,0 mm</i>								
C	-17,2	-19,3	-17,8	-18,1 A	64,52	71,70	46,30	60,84 A
C + Q	-20,7	-22,6	-22,3	-21,8 A	56,44	55,45	45,94	52,61 AB
Q	-18,3	-19,3	-19,7	-19,1 A	51,98	71,12	42,36	55,15 AB
P	-18,4	-21,8	-19,3	-19,8 A	46,08	40,99	28,58	38,55 B
Média	-18,6 a	-20,8 a	-19,8 a		54,75 a	59,81 a	40,79 b	
CV (%)		20,06		15,57		23,13		30,23
<i>Agregados 0,25 – 0,5 mm</i>								
C	-19,3	-21,3	-21,1	-20,59 A	61,86	75,03	51,24	62,71 A
C + Q	-20,2	-21,5	-19,7	-20,47 A	46,75	65,10	49,40	53,75 AB
Q	-19,8	-18,5	-19,6	-19,29 A	57,73	72,05	48,44	59,41 A
P	-18,3	-21,5	-20,5	-20,10 A	56,24	39,30	31,78	42,44 B
Média	-19,4 a	-20,7 a	-20,2 a		55,65 ab	62,87 a	45,22 b	
CV (%)		19,41		16,12		26,70		20,61
<i>Agregados 0,106 – 0,25 mm</i>								
C	-20,2	-21,7	-22,4	-21,4 A	74,78	82,93	57,81	71,84 A
C + Q	-19,7	-20,6	-19,4	-19,9 A	69,09	70,91	53,84	64,61 AB
Q	-22,4	-18,0	-19,2	-19,9 A	61,95	70,51	52,31	61,59 AB
P	-18,0	-21,4	-18,7	-19,4 A	52,47	47,65	34,81	44,98 B
Média	-20,1 a	-20,4 a	-19,9 a		64,57 ab	68,00 a	49,69 b	
CV (%)		18,25		17,38		29,31		25,44

C = cama de aviário; Q = adubação química; P = adubação padrão da Empresa; B = braquiária; E = estilosantes; SP = sem cobertura do solo; Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e letra minúscula na linha dentro de cada classe de agregado e cada atributo não diferem pelo teste Tukey a 10 %.

Tabela 6: Nitrogênio total (NT) e relação C/N em agregados do solo, na camada de 0 – 20 cm, após 16 meses da implantação de forrageiras com diferentes tipos de adubação na recuperação de área minerada de bauxita

Tipos de Adubação	Cobertura do Solo				Cobertura do Solo			
	B	E	SP	Média	B	E	SP	Média
----- NT (dag/kg de agregado) -----				----- C/N (dag/kg de agregado) -----				
<i>Agregados 2,0 – 8,0 mm</i>								
C	0,10	0,14	0,10	0,11 A	15,91	14,55	15,58	15,35 A
C + Q	0,09	0,10	0,08	0,09 A	17,12	15,32	17,11	16,52 A
Q	0,11	0,15	0,11	0,12 A	15,78	14,82	16,02	15,54 A
P	0,09	0,09	0,06	0,08 A	16,20	17,17	17,15	16,84 A
Média	0,10 b	0,12 a	0,09 b		16,25 a	15,47 a	16,46 a	
CV (%)		25,73		37,75		10,20		8,07
<i>Agregados 1,0 – 2,0 mm</i>								
C	0,11	0,15	0,11	0,13 A	15,04	14,15	14,91	14,70 B
C + Q	0,10	0,12	0,09	0,10 A	16,15	14,65	16,15	15,65 AB
Q	0,13	0,15	0,11	0,13 A	15,42	14,58	16,31	15,43 AB
P	0,10	0,09	0,07	0,09 A	15,55	17,79	16,68	16,67 A
Média	0,11 ab	0,13 a	0,09 b		15,54 a	15,29 a	16,01 a	
CV (%)		22,38		32,12		8,45		6,29
<i>Agregados 0,5 – 1,0 mm</i>								
C	0,12	0,18	0,12	0,14 A	14,76	12,97	14,38	14,04 B
C + Q	0,11	0,13	0,11	0,12 AB	15,43	14,81	15,03	15,09 AB
Q	0,13	0,15	0,11	0,13 AB	15,08	14,88	15,80	15,25 AB
P	0,10	0,09	0,07	0,09 B	15,63	17,42	16,74	16,60 A
Média	0,12 ab	0,14 a	0,10 b		15,23 a	15,02 a	15,49 a	
CV (%)		23,54		28,82		11,05		12,03
<i>Agregados 0,25 – 0,5 mm</i>								
C	0,13	0,16	0,12	0,14 A	14,09	13,88	14,54	14,17 A
C + Q	0,12	0,15	0,11	0,12 A	15,26	13,94	14,92	14,71 A
Q	0,13	0,15	0,11	0,13 A	15,51	14,47	16,17	15,39 A
P	0,11	0,12	0,07	0,10 A	14,94	14,26	16,33	15,18 A
Média	0,12 ab	0,14 a	0,10 b		14,95 a	14,14 a	15,49 a	
CV (%)		21,96		26,51		13,33		12,54
<i>Agregados 0,106 – 0,25 mm</i>								
C	0,14	0,19	0,13	0,16 A	13,97	12,38	13,23	13,19 A
C + Q	0,12	0,16	0,12	0,13 AB	14,72	13,11	14,55	14,13 A
Q	0,13	0,16	0,11	0,13 AB	14,59	13,88	16,01	14,83 A
P	0,11	0,10	0,07	0,09 B	14,50	16,28	15,84	15,54 A
Média	0,13 ab	0,15 a	0,11 b		14,44 a	13,91 a	14,91 a	
CV (%)		27,86		22,40		12,55		12,73

C = cama de aviário; Q = adubação química; P = adubação padrão da Empresa; B = braquiária; E = estilosantes; SP = sem cobertura do solo; Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e letra minúscula na linha dentro de cada classe de agregado em cada atributo não diferem pelo teste Tukey a 10 %.

Por outro lado, nas parcelas com plantas forrageiras, especialmente no estilosantes, há uma tendência de manutenção ou aumento dos teores de COT, que coincidem aproximadamente com os teores de COL. Isso indica, aparentemente, que a atividade microbiana tem atuado principalmente sobre o C adicionado pelas plantas de cobertura (C mais lábil), e que o efeito das plantas de cobertura têm sido não só na adição de C ao solo, mas também na preservação dos teores de C existentes no solo.

Quanto ao efeito da adubação, houve diferença no COT apenas nas classes de agregados menores que 0,5 mm (Tabela 4). Nestes agregados, não houve diferença entre a adubação Q e as adubações C e C+Q, sendo que a adubação C diferiu da padrão apenas na classe 0,106 – 0,25 mm, e a adubação Q diferiu da padrão nas duas classes. A adubação com cama de aviário (C), no entanto, aumentou o teor de COL e o IMC em relação à adubação padrão, exceto na classe de 2-8 mm. Em geral, O COL e o IMC nos agregados onde se aplicou as adubações C+Q e Q não diferiram da padrão e também foram equivalentes à adubação C. Assim, confirmando as alegações de Blair et al. (1995) e Dieckow et al. (2005), o COL e o IMC se mostraram sensíveis ao tratamento com cama de aviário e também às plantas de cobertura, podendo ser utilizados como indicadores da qualidade do solo em áreas mineradas em recuperação com forrageiras.

Nos tratamentos com adubação orgânica (C e C+Q), de modo geral, não houve aumento dos teores de C no solo. Esse padrão de resposta era esperado, uma vez que a cama de aviário possui aproximadamente 35,0 dag/kg de COT e que no primeiro ano em torno de 50 % desse adubo aplicado é mineralizado (CFSEMG, 1999). Desta forma, era de se esperar que mesmo aplicando 30 t/ha de cama de aviário, esse aumento não fosse superior a 0,2 dag/kg de solo, numa camada de 0- 20 cm ($D_s = 1,26 \text{ kg/dm}^3$, em média). Assim, o efeito da adubação, tanto química, quanto orgânica, sobre os atributos orgânicos dos agregados do solo parece estar mais relacionado ao efeito sobre o crescimento das plantas forrageiras, que por sua vez adicionam C ao solo pela exsudação de compostos orgânicos na rizosfera e pela decomposição das raízes (Haynes e Naidu, 1998).

3.3. Similaridade entre áreas não mineradas, pós-reconfiguração e em recuperação com forrageiras após mineração de bauxita

As duas primeiras variáveis canônicas (VC) concentraram 97,1 % da variação total das 22 variáveis avaliadas, sendo que a maior parte da variação foi explicada na

VC1 (95,8 %) enquanto a VC2 explicou apenas 1,3 % (Figura 2). As variáveis analisadas que mais contribuíram para a discriminação entre as áreas foram os teores de COT e NT, principalmente nas classes de agregados maiores que 1,0 mm (Figura 3). As que menos contribuíram (< 1,0 %) foram a $\delta^{13}\text{C}$ em todas as classes de agregados, o NT na classe de 0,25-0,5 mm, o COL nas classes menores que 1,0 mm, o DMP e o DMG. No entanto, nenhuma variável pode ser excluída das análises, uma vez que a exclusão de alguma delas alteraria o padrão de agrupamento (Cruz, 2006).

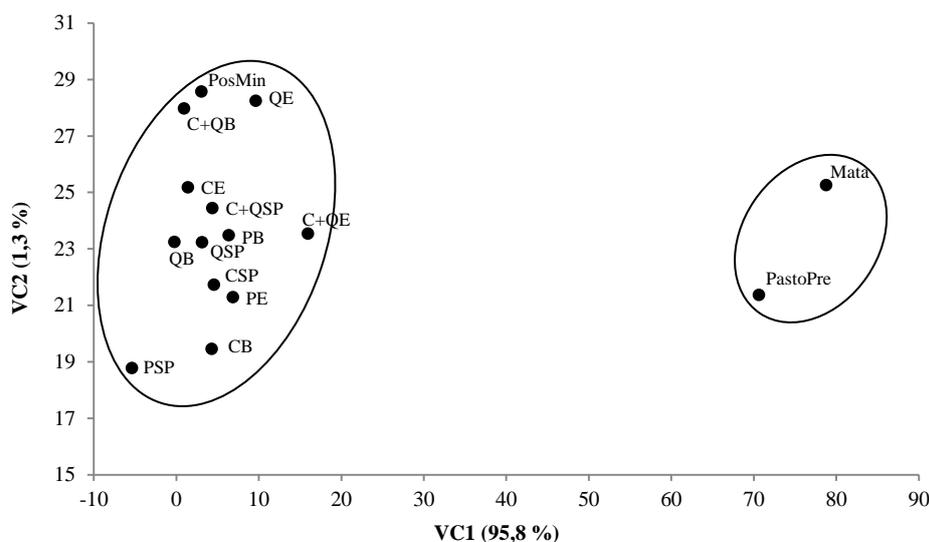


Figura 2: Dispersão gráfica dos escores em relação aos eixos representativos das variáveis canônicas (VC1 e VC2) relativos a 22 variáveis avaliadas em agregados do solo, na camada de 0-20 cm, de áreas pré-mineração (Mata e PastoPré), seis meses pós-reconfiguração (PosMin) e de áreas após 16 meses de recuperação com diferentes adubações (C – cama de aviário; Q – adubação química; C+Q – orgânica e química combinadas; P – adubação padrão da Empresa) e forrageiras (B – braquiária; E – estilosantes; SP – sem planta forrageira) após mineração de bauxita. Os círculos representam os grupos formados pelo método de agrupamento.

Os grupos formados pela análise de agrupamento foram marcados no diagrama de ordenação das variáveis canônicas (Figura 2), sendo identificados de forma significativa dois grupos (Figura 4): um grupo formado pelas áreas pré-mineração (mata e pasto) e outro grupo contendo a área pós-reconfiguração e todas as parcelas após 16 meses de aplicação dos tratamentos. Portanto, pode-se inferir que áreas pós-mineração apresentaram baixa similaridade com áreas não mineradas. Também é possível inferir que, levando-se em conta simultaneamente as variáveis orgânicas em todas as classes de agregados e a estabilidade dos agregados, os tratamentos não foram capazes, ainda, de se diferenciar da área pós-reconfiguração ou diferirem entre si. Este fato pode estar relacionado ao curto período de avaliação

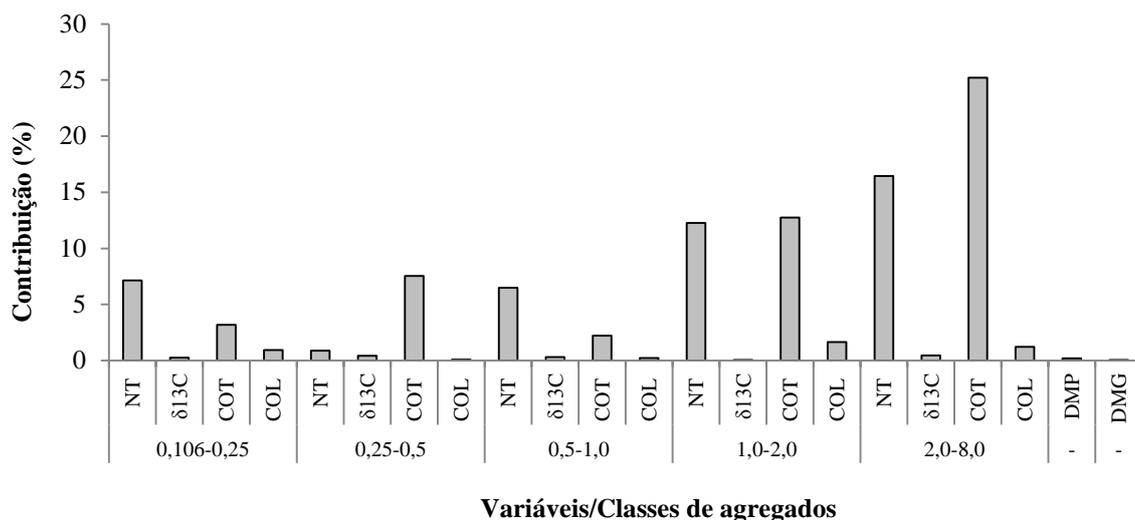


Figura 3: Contribuição relativa de cada variável para a divergência entre áreas pré-mineração, pós-reconfiguração e 16 meses após aplicação de tratamentos com diferentes tipos de adubação e forrageiras na recuperação de área minerada de bauxita.

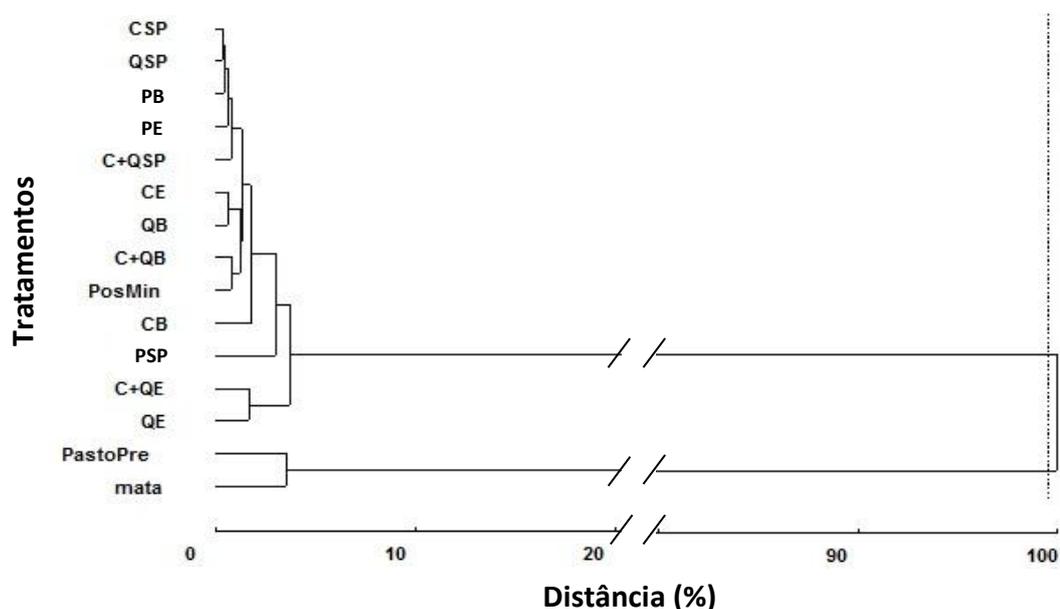


Figura 4: Dendrograma obtido pelo método UPGMA a partir das medidas de dissimilaridade entre áreas pré-mineração (Mata e PastoPré), seis meses pós-reconfiguração (PosMin) e após 16 meses da aplicação de tratamentos com diferentes adubações (C – cama de aviário; Q – adubação química; C+Q – orgânica e química combinadas; P – adubação padrão da Empresa) e forrageiras (B – braquiária; E- estilosantes; SP – sem planta forrageira) em área em recuperação após mineração de bauxita, baseado na distância generalizada de Mahalanobis, utilizando 22 variáveis avaliadas em agregados do solo na camada de 0-20 cm. Ponto de corte (linha vertical pontilhada) significativo em 100 % da distância de acordo com método de Mojena (1977).

(16 meses), demandando avaliações futuras que poderão discriminar os tratamentos que mais contribuem na agregação, uma vez que as forrageiras apresentaram efeito significativo sobre algumas variáveis orgânicas dos agregados, especialmente o COL (Tabela 4), em relação às parcelas sem planta. De fato, estudos realizados em solos de mineração de bauxita na Austrália mostraram perdas de 90 % do C e N total do solo, sendo necessário longo período de tempo (em torno de 33 anos) após a mineração para que esses elementos atingissem teores equivalentes aos de áreas não mineradas (Schwenke et al., 2000a,b,c).

4. CONCLUSÕES

O processo de mineração e reconfiguração altera os atributos orgânicos nos agregados do solo, exceto a relação C/N e a $\delta^{13}\text{C}$, porém não altera a distribuição e estabilidade dos agregados em comparação a uma área de mata nativa.

As forrageiras cultivadas nas áreas mineradas de bauxita melhoram os atributos orgânicos dos agregados do solo, principalmente com o uso do estilosantes, entretanto, sem alterar a distribuição e a estabilidade dos agregados.

De modo geral, a adubação com cama de frango isolada é o tratamento que apresenta diferenças mais significativas quanto aos atributos orgânicos em agregados, principalmente o COL e IMC.

O COL e o IMC são sensíveis ao uso do solo, ao impacto causado pela mineração e aos tratamentos com adubação e forrageiras após 16 meses de recuperação de áreas mineradas de bauxita.

A análise conjunta dos atributos de todas as classes de agregados demonstra que áreas após mineração apresentam alta dissimilaridade em relação às áreas não mineradas, sendo que os atributos COT e NT são os que mais contribuem na discriminação das áreas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIVEN, S.; MENASSERI, S.; CHENU, C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. **Soil Biol. Biochem.**, 41: 1-12, 2009.

- AMARAL, C. S.; SILVA, E. B.; AMARAL, W. G.; NARDIS, B.O. Crescimento de *Brachiaria brizantha* pela adubação mineral e orgânica em rejeito estéril da mineração de quartzito. **Biosci. J.**, 28(1): 130-141, 2012.
- BARKER, A. V.; BRYSON G. M. Nitrogen. In: BARKER, A. V.; PILBEAM, D. J. **Handbook of Plant Nutrition**. Boca Raton: CRC – Taylor & Francis Group, p. 21-50, 2006.
- BERNOUX, M.; CERRI, C. C.; NEILL, C.; MORAES, J. F. L. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. **Geoderma**, 82: 43-58, 1998.
- BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D. B. & LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index, for agricultural systems. **Aust. J. Agric. Res.**, 46: 1459–1466, 1995.
- CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **R. Bras. Ci. Solo**, 22: 527-538, 1998.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS – CFSEMG. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. 359 p.
- CRUZ, C. D. **Programa Genes: Biometria**. Viçosa: UFV, 382 p. 2006.
- DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KNABNER, I. K. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilization. **Plant Soil**, 268: 319-328, 2005.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ci. Agrotec.**, 35(6): 1039-1042, 2011.
- HAYNES, R. J.; NAIDU, R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. **Nut. Cycl. Agroecos.**, 51: 123-137, 1998.
- HAYNES, R. J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. **Soil Biol. Biochem.**, 32: 211-219, 2000.
- JOHN, B.; YAMASHITA, T.; LUDWIG, B.; FLESSA, H. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. **Geoderma**, 128: 63-79, 2005.
- KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregation. In: BLACK, C. A., (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, p. 499-510, 1965. (Agronomy, 9).
- LORENZ, K., LAL, R., 2007. Stabilization of organic carbon in chemically separated pools in reclaimed coal mine soils in Ohio. **Geoderma**, 141: 294–301, 2007.

MATOS, E. S.; MENDONÇA, E. S.; LEITE, L. F. C.; GALVÃO, J. C. C. Estabilidade de agregados e distribuição de carbono e nutrientes em Argissolo sob adubação orgânica e mineral. **Pesq. Agropec. Bras.**, 43: 1221-1230, 2008.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.; LOVATO, T.; FERNANDES, F. F.; DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S. S.; ALVAREZ V., V. H., (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**, 3. Viçosa: SBCS, p.209-248, 2003.

MOJENA R. Hierarchical grouping methods and stopping rules: an evaluation. **The Comp. J.**, 20: 359-363, 1977.

OLIVEIRA, J. T.; MOREAU, A. M. S. S.; PAIVA, A. Q.; MENEZES, A. A.; COSTA, O. V. Características físicas e carbono orgânico de solos sob diferentes tipos de uso da terra. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 32: 2821-2829, 2008.

PASSOS, R. R.; RUIZ, H. A.; CANTARUTTI, R. B.; MENDONÇA, E. S. Carbono orgânico e nitrogênio em agregados de um Latossolo Vermelho distrófico sob duas coberturas vegetais. **R. Bras. Ci. Solo**, 31: 1109-1118, 2007.

RASSOL, R.; KUKAL; S. S.; HIRA, G.S. Soil organic carbon and physical properties as affected by long-term application of FYM and inorganic fertilizers in maize-wheat system. **Soil Till. Res.**, 101: 31-36, 2008.

SANTOS, D. S.; ARRUDA, E. M.; MORAES, E. R.; FRANCO, F. O.; ARAÚJO, J. R.; RESENDE, T. M.; BORGES, E. N.; RIBEIRO, B. T. Atributos físicos e matéria orgânica de áreas de Latossolo utilizadas para atividade pecuária no bioma Cerrado. **Biosci. J.**, 28(4): 500-508, 2012.

SINGH, D. The relative importance of characters affecting genetic divergence. **The Indian J. Genet. Plant Breed.**, 41: 237-245, 1981.

SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter lability in a Tropical Oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density, and magnetic fractionations. **Soil Sci.**, 162: 795-807, 1997.

SHRESTHA, R. K.; LAL, R. Land use impacts on physical properties of 28 years old reclaimed mine soils in Ohio. **Plant Soil**, 306: 249-260, 2008.

SHUKLA, M. K.; LAL, R.; EBINGER, M. Soil quality indicators for reclaimed minesoils in southeastern Ohio. **Soil Sci.**, 169:133-142, 2004.

SCHWENKE, G. D.; MULLIGAN, D. R.; BELL, L. C. Soil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite-mined land at Weipa. I. Initial changes to soil organic matter and related parameters. **Aust. J. Soil Res.**, 38: 345-369, 2000a.

SCHWENKE, G. D.; AYRE, L.; MULLIGAN, D. R.; BELL, L. C. Soil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite-mined land at Weipa. II. Soil organic matter dynamics in mine. **Aust. J. Soil Res.**, 38: 371-393, 2000b.

SCHWENKE, G. D.; MULLIGAN, D. R.; BELL, L. C. Soil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite-mined land at Weipa. III. Simulated long-term soil organic matter development. **Aust. J. Soil Res.**, 38: 395-410, 2000c.

SIQUEIRA, J. O. **Biologia do solo**. Lavras: ESAL/FAEPE, 1993. 230p.

SIX, J.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E. T.; COMBRIK, C. Soil structure and organic matter: I. distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 64: 681-689, 2000.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K.; DORAN, W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 62: 1367-1377, 1998.

SOUZA, H. A.; MARCELO, A. V.; CENTURION, J. F. Carbono orgânico e agregação de um Latossolo Vermelho com colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Rev. Ci. Agron.**, 43(4): 658-663, 2012.

THURMAN, N. C.; SENCINDIVER, J. C. Properties, classification and interpretations of minesoils at two sites in West Virginia. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 50: 181-185, 1986.

YU, H.; DING, W.; LUO, J.; GENG, R.; CAI, Z. Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil. **Soil Till. Res.**, 124: 170-177, 2012.

ZHANG, M.; FU, X.-H.; FENG, W.-T.; ZOU, X. Soil organic carbon in pure rubber and tea-rubber plantations in South-Western China. **Trop. Ecol.**, 48: 201-207, 2007.

ZHOU, H.; PENG, X.; PETH, S.; XIAO, T. Q. Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography. **Soil Till. Res.**, 124:17-23, 2012.

Capítulo III

CRESCIMENTO DO CAFEIEIRO E DE PLANTAS DE COBERTURA INTERCALARES E PERDAS DE ÁGUA E SOLO EM ÁREAS MINERADAS DE BAUXITA SOB DIFERENTES TIPOS DE ADUBAÇÃO

RESUMO

A exploração de bauxita exige a retirada da vegetação e da camada de solo superficial, causando distúrbios substanciais ao solo, que podem ser ampliados pela ocorrência de processos erosivos. Dessa forma, as empresas mineradoras assumem o compromisso de recuperação da área minerada com a mesma cultura pré-existente, representando um grande desafio implantar e garantir o desenvolvimento dessas culturas de forma viável a médio e longo prazo. Neste sentido, este trabalho foi proposto com o objetivo de avaliar o crescimento do cafeeiro e de diferentes plantas de cobertura intercalares, a extração de nutrientes pelas plantas de cobertura, e as perdas de água e solo por erosão hídrica em áreas mineradas de bauxita em fase de recuperação com diferentes tipos de adubação. O experimento foi instalado oito meses após a mineração e reconfiguração, avaliando-se o efeito de quatro tipos de adubação: i) T - testemunha (sem adubação); ii) C - cama de aviário ; iii) Q - adubação química; iv) C+Q - adubação química + cama de aviário. As mudas de *Coffea arabica* var. Catuaí vermelho foram plantadas no espaçamento 2,0 x 0,5 m e nas entrelinhas implantou-se quatro tipos de plantas de cobertura intercalares (PC): i) sem planta; ii) *Brachiaria brizantha* cv. Piatã - braquiária (B), iii) estilosantes cv. Campo Grande (E), iv) consórcio braquiária-estilosantes (B+E). Durante o primeiro ano avaliou-se a produção de matéria seca (MS) e extração de nutrientes em cinco colheitas das plantas de cobertura. Após 21 meses de crescimento do cafeeiro foram avaliadas a altura, o diâmetro do coleto, o número de ramos plagiotrópicos e o número de nós por ramo na altura média. Parcelas coletoras de água e solo foram instaladas nos tratamentos com braquiária adubada com cama de aviário (CB) e química (QB) e nos tratamentos sem planta de cobertura (CSP e QSP) com avaliações a cada chuva. De modo geral, a adubação C aumentou a produção de MS e a extração de nutrientes pelo E, as adubações C e C+Q aumentaram a MS e a extração de nutrientes pela B e pelo consórcio B+E. A produção de MS e a extração de nutrientes pelas plantas de cobertura B e B+E não diferiram, sendo superiores a do estilosantes. O estilosantes representou pequena proporção (< 10 %) da biomassa e dos nutrientes extraídos no consórcio B+E com as adubações C e C+Q, mas não nas adubações Q e T. As adubações C, C+Q e Q apresentaram, em média, o mesmo efeito sobre o crescimento do cafeeiro. As PC's não aumentaram o crescimento do cafeeiro, sendo que a braquiária reduziu seu crescimento. A braquiária adubada com cama de aviário (CB) reduziu as perdas de água e solo em 75 % comparada à QB. Nas parcelas sem planta, a adubação orgânica também reduziu em 65,5 % as perdas de água e em 58 % as de solo. Portanto, os resultados indicam que é viável o cultivo de cafeeiro em áreas mineradas de bauxita desde que adequadamente manejado. A adubação com cama de aviário, isolada ou combinada com adubação mineral, e o consórcio de braquiária com leguminosa são os tratamentos que apresentam melhor extração e ciclagem de nutrientes, diminuem as perdas de água e solo e melhoram o crescimento do cafeeiro sobre áreas mineradas de bauxita em recuperação.

Palavras-chave: erosão, recuperação de áreas degradadas, ciclagem de nutrientes

1. INTRODUÇÃO

A importância econômica e social das atividades de mineração, em especial a do alumínio, para o Brasil é inegável. No entanto, a mineração de bauxita causa distúrbios substanciais ao solo, como a remoção e a inversão das camadas superficiais, compactação, perda da matéria orgânica e de nutrientes, exposição de materiais pouco intemperizados e menor atividade biológica (Schwenke et al., 2000; Ward, 2000). Além disso, a ocorrência de processos erosivos durante e após a atividade de lavra pode causar a perda de nutrientes, matéria orgânica e o assoreamento de cursos d'água, ampliando os impactos ambientais para além do local de mineração. Tais distúrbios exigem o emprego de práticas de manejo específicas que levem à recuperação dos sítios minerados.

Na região da Zona da Mata de Minas Gerais as jazidas de bauxita se encontram principalmente sob florestas naturais, pastagens, plantios florestais e cultivos agrícolas, especialmente a cultura do café, pertencentes em sua maioria a pequenos e médios produtores. Para exploração de bauxita é necessário a retirada da vegetação e da camada de solo superficial, demandando posterior recuperação da área, compromisso legal, ambiental e social assumido pelas empresas mineradoras. Assim, surge o desafio de implantar e garantir o desenvolvimento das culturas de forma viável a médio e longo prazo em um solo com características físicas, químicas e biológicas profundamente alteradas pela mineração.

A erosão tem sido apontada como uma das maiores causas da degradação dos solos (Martins, 2003; Silva, 2005a; Thomaz, 2009). Áreas mineradas são extremamente sensíveis aos agentes erosivos devido à falta de cobertura do solo, compactação pelo trânsito de máquinas e desagregação das partículas gerada pelo revolvimento das camadas superficiais (Shrestha e Lal, 2011; Krümmelbein e Raab, 2012). Dessa forma, as práticas de recuperação das áreas mineradas devem promover a quebra de camadas compactadas, o rápido recobrimento da área e a adição de compostos orgânicos, que desempenham importante papel na agregação e na infiltração de água no solo.

Existem evidências de que a decadência e o quase que desaparecimento da atividade cafeeira em algumas regiões do país esteve diretamente relacionado com o manejo inadequado do solo, resultando em perdas de matéria orgânica do solo (MOS) e, conseqüentemente, de sua capacidade produtiva (Dantas e Netto, 1996).

Grandes perdas de MOS são observadas em áreas mineradas (Carneiro et al, 2008; Schwencke et al., 2000). Assim, o restabelecimento de plantios de cafeeiro sobre essas áreas demanda ações que levem à recuperação dos teores de MOS a níveis sustentáveis a médio e longo prazo.

É fato conhecido que a adubação orgânica em áreas degradadas pode trazer benefícios no processo de recuperação pelas melhorias das condições do solo para o desenvolvimento das plantas, como maior disponibilidade de nutrientes, aumento da CTC, melhor agregação, maior retenção de água e aumento do C do solo com consequente aumento da atividade microbiana, dentre outras (Andreola et al., 2000; Favaretto et al., 2000a,b; Carneiro et al., 2008). Outra grande vantagem do uso de adubação orgânica deve-se ao fato da disponibilização dos nutrientes para as plantas ser lenta, à medida que o material é decomposto (Silva, 2005b), o que nem sempre é possível com a adubação química. Assim, a adubação orgânica pode promover o fornecimento de nutrientes de forma mais sincronizada à demanda nutricional da planta ao longo de seu ciclo de vida, o que melhora o crescimento e a eficiência no uso da adubação.

Na região da Zona da Mata de Minas Gerais estima-se que são produzidas cerca de 300 toneladas por dia de cama de aviário (Resende et al., 2009), gerando um passivo ambiental para os avicultores relativo ao acúmulo dos resíduos. Assim, o uso deste resíduo como fertilizante em áreas mineradas precisa ser avaliado, podendo ser uma das alternativas para solucionar um problema ambiental da região, e ainda proporcionar melhorias nas condições do solo de áreas em recuperação com culturas agrícolas.

As plantas de cobertura intercalares podem trazer benefícios ao solo e à cultura principal por reduzirem processos erosivos, reter umidade, funcionar como adubos verdes, aumentarem o aporte de matéria orgânica ao solo e reduzir infestação de plantas daninhas, com consequentemente redução de custos com capinas (Pavan et al., 1986; Paulo et al., 2001; Santos et al., 2008). As plantas de cobertura desempenham, ainda, importante papel na ciclagem de nutrientes em sistemas agrícolas, devido à absorção e acúmulo dos nutrientes na fitomassa que, posteriormente, podem estar disponíveis para a cultura principal após decomposição do material vegetal, além de evitar perda de nutrientes por lixiviação, volatilização e erosão (Rosolem et al., 2003; Carpim et al., 2008; Carvalho et al., 2008).

Estudos que quantifiquem as perdas de água e solo em áreas mineradas em

processo de recuperação são escassos, assim como estudos que avaliem a produção e sustentabilidade de atividades agrícolas sobre essas áreas. Esses estudos são essenciais para a compreensão da magnitude dos impactos causados e para o monitoramento da recuperação da área. Assim, este estudo foi proposto para avaliar o crescimento do cafeeiro e de plantas de cobertura intercalares e as perdas de água e de solo por escoamento superficial em áreas mineradas de bauxita em fase de recuperação com diferentes tipos de adubação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo e instalação do experimento

O estudo foi conduzido em condições de campo em propriedade localizada no município de São Sebastião da Vargem Alegre, na Zona da Mata de Minas Gerais, em área onde houve extração de bauxita sob concessão da Companhia Brasileira de Alumínio – Votorantim Metais. O solo dominante na região é o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico.

Após o processo de lavra, a área foi reconfigurada, o que consistiu nas seguintes operações: o subsolo exposto durante a lavra foi descompactado com subsolador equipado com hastes de 0,6 m de comprimento, espaçadas 0,4 m, tracionado por trator de esteira D6. Em seguida, o solo decapeado (horizontes A e B que se encontravam acima do minério e que foram removidos no processo de lavra) e que estava amontoado em leiras (durante 15 meses) foi espalhado na área, numa camada de 0,4 a 0,6 m, com o auxílio de um trator de esteira. Novamente o terreno foi descompactado com subsolador equipado com hastes de 0,6 m de comprimento, espaçadas 0,4 m, tracionado por trator de esteira D6, com uma passada paralela ao declive do terreno, seguida de uma passada perpendicular. Finalmente, terraços em nível foram construídos, distribuídos ao longo da pendente do terreno.

Amostras deformadas e indeformadas de solo nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm foram coletadas seis meses após a reconfiguração para caracterização química e física (Tabela 1) da área de estudo antes da aplicação dos tratamentos, conforme EMBRAPA (1997).

Tabela 1: Características químicas e físicas nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm de solo seis meses pós-reconfiguração de área minerada de bauxita

Características do solo	Camada (cm)		
	0-20	20-40	40-60
pH (H ₂ O)	5,23	5,10	4,98
Carbono orgânico total (dag/kg)	1,45	1,32	0,99
Nitrogênio total (g/kg)	0,85	0,55	0,39
P (mg/dm ³)	1,05	0,74	0,78
K ⁺ (cmol _c /dm ³)	0,07	0,10	0,10
Ca ²⁺ (cmol _c /dm ³)	0,37	0,48	0,62
Mg ²⁺ (cmol _c /dm ³)	0,13	0,16	0,19
S (mg/dm ³)	4,58	11,50	18,50
Mn (mg/dm ³)	5,04	5,13	9,05
Fe (mg/dm ³)	174,91	187,34	156,68
Cu (mg/dm ³)	0,60	0,72	1,50
Zn (mg/dm ³)	1,25	1,06	1,27
Al ³⁺ (cmol _c /dm ³)	0,10	0,06	0,00
H + Al (cmol _c /dm ³)	3,91	4,09	3,55
Soma de Bases - SB (cmol _c /dm ³)	0,57	0,74	0,91
Capacidade de troca de cátions a pH 7 (cmol _c /dm ³)	4,48	4,83	4,46
Capacidade de troca de cátions efetiva (cmol _c /dm ³)	0,67	0,80	0,91
Saturação por bases (%)	12,72	15,32	20,40
Saturação por Al ³⁺ (%)	14,93	7,50	0,00
Fósforo remanescente (mg/L)	5,55	8,61	9,59
Argila (g/kg)	640,0	590,0	520,0
Silte (g/kg)	70,0	90,0	110,0
Areia (g/kg)	290,0	320,0	370,0
Densidade do solo (kg/dm ³)	1,25	1,33	1,42
Densidade de partículas (kg/dm ³)	2,89	2,88	2,83
Macroporosidade (dm ³ /dm ³)	0,32	0,26	0,22
Microporosidade (dm ³ /dm ³)	0,25	0,28	0,28
Porosidade Total (dm ³ /dm ³)	0,57	0,54	0,50
Umidade na capacidade de campo (kg/kg)	0,24	0,26	0,25
Diâmetro médio ponderado (mm)	3,19	3,13	3,13
Diâmetro médio geométrico (mm)	2,06	1,94	1,85

O experimento de recuperação da área minerada com cafeeiro foi instalado oito meses após a reconfiguração, utilizando o delineamento em blocos ao acaso, no esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. Os blocos experimentais foram alocados entre os terraços em nível. As parcelas mediam 28 x 14 m e receberam os tratamentos com adubação de plantio (Tabela 2) que consistiram de: T - testemunha (sem adubação); C – adubação orgânica (50 t/ha (base seca) de cama de aviário, sendo 1/2 da dose aplicada no sulco de plantio e 1/2 na entrelinha); Q - adubação química (8 t/ha de calcário dolomítico com 80 % de PRNT, sendo 1/3 da dose no sulco de plantio e 2/3 na entrelinha; 1,5 t/ha de fosfato natural reativo

Bayóvar aplicado no fundo do sulco e 0,70 t/ha aplicado na entrelinha; adubações em cobertura somente na linha de plantio, conforme Tabela 3); C+Q – adubação orgânica e química combinadas.

Tabela 2: Fontes e quantidades totais de nutrientes e carbono orgânico adicionados na implantação de cafeeiro e plantas de cobertura intercalares com diferentes adubações na recuperação de área minerada de bauxita

Adubação	Local	Fonte	MS	COT	N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Fe	Cu	Zn
			---t/ha---		-----kg/ha-----									
<i>Orgânica</i> (C)	L	CA	25,0	8,8	605,4	235,0	578,9	531,6	91,4	123,3	8,3	188,6	1,3	7,0
	EL	CA	25,0	8,8	605,4	235,0	578,9	531,6	91,4	123,3	8,3	188,6	1,3	7,0
	Total (L + EL)			17,6	1.210,9	470,0	1.157,7	1.063,2	182,7	246,6	16,6	377,2	2,6	14,0
<i>Orgânica</i> + <i>Química</i> (C+Q)		Calcário	2,67	-	-	-	-	756,7	193,0	-	-	-	-	-
	L	CA	25,0	8,8	605,4	235,0	578,9	531,6	91,4	123,3	8,3	188,6	1,3	7,0
		FNR	1,5	-	9,9	195,1	1,6	483,0	5,3	20,3	0,1	0,1	0,0	0,1
	Total L			8,8	615,3	430,1	580,4	1.771,3	289,6	143,6	8,4	188,7	1,3	7,1
	EL	Calcário	5,33	-	-	-	-	1513,1	385,9	-	-	-	-	-
	CA	25,0	8,8	605,4	235,0	578,9	531,6	91,4	123,3	8,3	188,6	1,3	7,0	
	FNR	0,70	-	4,6	91,0	0,7	225,4	2,5	9,5	0,0	0,0	0,0	0,1	
Total EL			8,8	610,1	326,0	579,6	2.270,1	479,7	132,8	8,3	188,6	1,3	7,1	
Total (L + EL)			17,6	1.225,4	756,1	1.160,0	4.041,4	769,3	276,3	16,7	377,3	2,6	14,2	
<i>Química</i> (Q)		Calcário	2,67	-	-	-	-	756,7	193,0	-	-	-	-	-
	L	FNR	1,5	-	9,9	195,1	1,6	483,0	5,3	20,3	0,1	0,1	0,0	0,1
	Total L			-	9,9	195,1	1,6	1.239,7	198,2	20,3	0,1	0,1	0,0	0,1
	EL	Calcário	5,33	-	-	-	-	1.513,1	385,9	-	-	-	-	-
		FNR	0,70	-	4,6	91,0	0,7	225,4	2,5	9,5	0,0	0,0	0,0	0,1
Total EL			-	4,6	91,0	0,7	1.738,5	388,4	9,5	0,0	0,0	0,0	0,1	
Total (L + EL)			-	14,5	286,1	2,3	2.978,3	586,6	29,7	0,1	0,1	0,0	0,2	
<i>Testemunha</i> (T)	Sem adubação													

CA = cama de aviário; L = linha de plantio do cafeeiro; EL = entrelinha; MS = massa seca; FNR = fosfato natural reativo (Fonte: Fertilizantes Heringer S.A)

Cada parcela principal continha quatro subparcelas, medindo 14 m x 7 m, que receberam as plantas de cobertura intercalares: SP - sem planta de cobertura, mantendo a área limpa com aplicação de herbicida pré-emergente quando necessário; B – semeadura de braquiária (25 kg/ha de sementes viáveis de *Brachiaria brizantha*, cv. Piatã); E – semeadura de estilosantes (cv. Campo Grande, que é uma mistura de

sementes de duas espécies: 80 % de *Stylosanthes capitata* e 20 % de *Stylosanthes macrocephala*, com 2,5 kg/ha de sementes viáveis,); B+E – consórcio braquiária-estilosantes (12,5 kg/ha de sementes viáveis de braquiária e 1,25 kg/ha de sementes viáveis de estilosantes).

Tabela 3: Adubações de cobertura aplicadas na linha de plantio do cafeeiro nos tratamentos Q e C+Q

Forma de adubação	Tipo de Adubo	Quantidade/Aplicação	Unidade	Tempo após plantio
Via solo	N-P-K 08-28-16	100	g/planta	2 e 20 dias
	N-P-K 20-05-20	100	g/planta	11 meses
	KCl + 1% de Boro	100	g/planta	14 meses
Via foliar	Micronutrientes*	100	g/ha	2 meses
	Micronutrientes*	300	g/ha	4 meses
	Micronutrientes*	1.000	g/ha	11 meses
	Micronutrientes*	1.600	g/ha	19 meses

*Produto comercial Plantin II[®] (N:10,0; Ca: 1,5; Mg: 1,0; S: 3,5; Zn: 6,0; B: 3,0; Fe: 0,5; Mn: 0,5; Cu: 0,5; Mo: 0,05 %).

Para o plantio das mudas de cafeeiro foram abertos sulcos, perpendiculares à declividade do terreno, com profundidade de 0,4 m e espaçados 2,0 m, utilizando equipamento mecanizado. Em seguida a cama de aviário foi aplicada manualmente, procedendo-se sua incorporação no sulco de plantio até a profundidade de 0,4 m e, na entrelinha na camada de 0-0,15 m. Em seguida, foi aplicado e incorporado o calcário nas parcelas dos respectivos tratamentos com adubação química (Q e C+Q). Após 30 dias da aplicação da cama de aviário e do calcário, foi efetuado, nos sulcos, o plantio das mudas de cafeeiro (*Coffea arabica*, var. Catuaí vermelho), na data de 01/02/2011, aplicando-se o fosfato natural no fundo do sulco naqueles tratamentos com adubação química. O espaçamento entre plantas na linha de plantio foi de 0,5 m, totalizando 392 plantas por parcela distribuídas em sete linhas de plantio.

Nas entrelinhas do cafeeiro foram semeadas manualmente, em 15/03/2011, as sementes de braquiária e estilosantes, em quatro sulcos de 0,02 m de profundidade e espaçados 0,25 m, cobrindo uma faixa de 1,0 m da parte central das entrelinhas do cafeeiro. No tratamento com consórcio braquiária-estilosantes, os dois sulcos centrais receberam as sementes de braquiária e os dois sulcos mais próximos das linhas de plantio do cafeeiro receberam as sementes de estilosantes. Nos tratamentos com adubação química, o fosfato natural foi aplicado no fundo dos sulcos de semeadura.

A área útil de avaliação de cada subparcela continha as cinco linhas de plantio centrais do cafeeiro, com oito plantas cada uma, totalizando 40 plantas efetivas por subparcela.

Devido à baixa precipitação no período que sucedeu o plantio do café em fevereiro (Figura 1), as mudas de cafeeiro foram irrigadas com dois a três litros de água a cada dois dias durante a primeira semana e a cada quatro dias nas duas semanas seguintes para garantir o bom estabelecimento. O controle de invasoras foi feito por meio de capinas manuais e herbicidas pré-emergentes, e o controle de pragas e doenças, por meio da aplicação de fungicidas e inseticidas registrados para a cultura, quando necessário.

Dados de pluviosidade e temperaturas máxima e mínima (Figura 1) foram obtidos em estação climatológica automatizada instalada no local do experimento, com armazenamento dos dados a cada 24 horas.

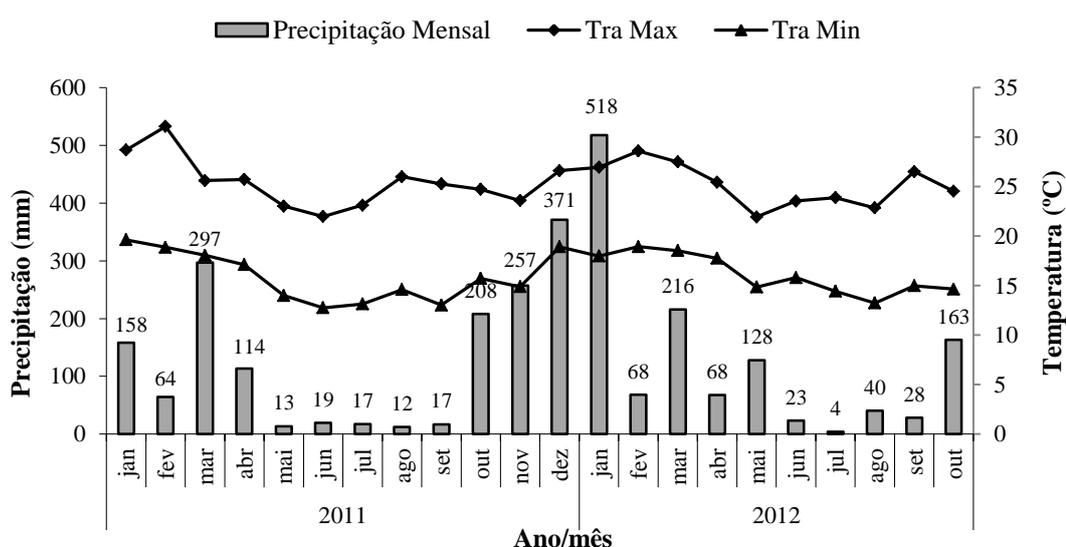


Figura 1: Precipitações mensais e médias mensais das temperaturas máxima (Tra Max) e mínima (Tra Min) no período de duração do experimento.

2.2. Produção de matéria seca e extração de nutrientes pelas plantas de cobertura intercalares

Durante o primeiro ano de crescimento das plantas de cobertura (15/03/2011 a 14/03/2012), realizaram-se cinco cortes para avaliação da produção de matéria seca (MS) e da quantidade de nutrientes extraídos pelas plantas. Os cortes foram feitos após 60 (1º corte), 126 (2º corte), 246 (3º corte), 309 (4º corte) e 364 (5º corte) dias após a semeadura, utilizando como critério para escolha do momento do corte quando a braquiária no tratamento com maior crescimento atingisse 0,6 m de altura.

As amostras de material vegetal foram colhidas em duas faixas de 2 m² (duas linhas de semeadura das plantas de cobertura medindo 4 m de comprimento), localizadas cada uma em uma entrelinha do cafeeiro, totalizando uma área colhida de 4 m² dentro da área útil de cada subparcela. No tratamento de consórcio braquiária-estilosantes foram colhidas uma linha de braquiária e uma linha de estilosantes em cada área de amostragem. O corte da braquiária foi realizado a uma altura de 0,20 a 0,25 m da superfície do solo e o do estilosantes de 0,10 a 0,15 m para permitir a rebrotação das plantas. O material colhido foi reunido em uma única amostra e a massa fresca quantificada no campo. No tratamento B+E, o material produzido pela braquiária e pelo estilosantes foi quantificado separadamente. Subamostras das plantas foram retiradas, lavadas em água destilada e secas em estufa de ventilação forçada a 60 °C por 72 horas para determinação da massa seca e, em seguida, foram trituradas em moinho tipo Wiley com peneira de malha de 0,5 mm para análise química posterior.

O restante da massa vegetal da subparcela foi cortado e depositado na linha de plantio do cafeeiro servindo de cobertura morta do solo, numa faixa de 0,5 m de cada lado das plantas.

Subamostras foram mineralizadas com ácidos nítrico e perclórico a quente na proporção 3,5:1, e as concentrações de P (colorimetria), K (fotometria de chama), S (turbidimetria), Ca, Mg, Mn, Fe, Cu e Zn (espectrometria de absorção atômica) foram determinadas no extrato. O teor de N nas amostras foi determinado por meio de digestão sulfúrica seguido de destilação semi-micro Kjehldal (Bataglia et al., 1983).

A quantidade de nutriente absorvido em cada corte foi calculada pela fórmula: nutriente absorvido (kg/ha) = [matéria seca (t/ha) x teor do nutriente (g/kg)]. A quantidade de cada nutriente acumulada no período foi obtida pela soma das quantidades do nutriente nos cinco cortes. No tratamento B+E, também calculou-se a proporção (%) do total de cada nutriente que foi extraída pela braquiária e pelo estilosantes em cada corte.

2.3. Crescimento do cafeeiro

Após 21 meses do plantio (01/11/12) foi avaliado o crescimento das plantas de cafeeiro, medindo-se 16 plantas em duas linhas de plantio (oito plantas cada)

dentro da área útil de cada subparcela. Foram avaliados a altura, o diâmetro do caule ao nível do solo (DC), o número de ramos plagiotrópicos por planta e o número de nós por ramo na altura média medidos nos quatro quadrantes da planta.

2.4. Perdas de água e solo por escoamento superficial

Os tratamentos com adubação orgânica e com adubação química, contendo braquiária e sem planta de cobertura, foram selecionados para avaliação das perdas de água e solo por escoamento superficial, totalizando quatro tratamentos avaliados (QB – braquiária com adubação química; CB – braquiária com adubação orgânica com cama de aviário; QSP – sem planta de cobertura e adubação química; CSP – sem planta de cobertura e adubação orgânica com cama de viário). As avaliações foram efetuadas durante o período de março de 2011 a agosto de 2012, por meio de parcelas coletoras com dimensões de 4,0 x 12,0 m, instaladas dentro de cada subparcela contendo os tratamentos selecionados. As parcelas coletoras foram delimitadas com chapas de PVC com 0,20 m de largura, que foram enterradas 0,10 m no solo (Figura 2A). O comprimento maior obedeceu ao sentido do declive, sendo escolhidos locais com o declive médio característico da área estudada.

Na parte inferior das parcelas foram construídos coletores de concreto, medindo 4,0 x 0,3 x 0,4 m (comprimento x largura x profundidade) onde eram coletadas a água e o solo perdidos (Figura 2B). Canos de PVC de 50,0 mm de diâmetro foram instalados na parte superior das caixas para conduzir a água, após o enchimento, até tanques de plástico com capacidade de 200 L. A água perdida era quantificada após cada chuva e o solo a cada três meses.



Figura 2: Parcela coletora de água e solo perdidos por escoamento superficial em área em recuperação com cafeeiro após mineração de bauxita. A) contorno da parcela coletora com chapas de PVC; B) caixa coletora construída em concreto.

2.5. Análises estatísticas

Os dados de MS, por corte e acumulada nos cinco cortes, de quantidades de nutrientes extraídos por hectare (acumulados nos cinco cortes) e o total de água e solo perdidos por escoamento superficial durante o período de avaliação foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelos testes F ou Tukey a 10 % de probabilidade de erro, utilizando o programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2011). Quando necessário, os dados foram transformados para \sqrt{Y} ou $\ln Y$, adicionando-se as constantes 0,5 ou 1,0, se necessárias, para que os desvios seguissem a distribuição normal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Produção de matéria seca pelas plantas de cobertura intercalares

Houve interação significativa ($p < 0,01$) entre os tipos de adubações e de plantas de cobertura sobre a produção de matéria seca (MS). Durante os quatro primeiros meses (1º e 2º corte) apenas nos tratamentos com aplicação de cama de aviário, tanto isolada, quanto combinada com adubação química, as plantas de cobertura atingiram a altura de corte sendo contabilizada a produção de MS (Figura 3). Em áreas mineradas é desejável que haja um rápido crescimento inicial das plantas para promover a cobertura do solo e reduzir a suscetibilidade à erosão (Shrestha e Lal, 2011; Krümmelbein e Raab, 2012). Isto demonstra que é necessário o adequado fornecimento de nutrientes para que as plantas de cobertura possam se desenvolver rapidamente, e que a adição de cama de aviário pode suprir tal demanda, principalmente quando combinada com a adubação mineral.

As adubações C e C+Q aumentaram a produção de MS da braquiária e do consórcio B+E em relação às adubações Q e T em todos os cortes e no total acumulado (Figura 3). Os efeitos das adubações C e C+Q sobre a produção de MS de todas as plantas de cobertura não diferiram ($p > 0,1$), exceto para a braquiária em monocultivo no 1º, 2º e 3º corte, e para o consórcio B+E, no 2º corte, onde a adubação C+Q foi superior.

Não houve efeito das adubações até o 3º corte sobre a MS do estilosantes e, a partir do 4º corte e no acumulado do período, a adubação C aumentou a produção de MS do estilosantes em relação à Q e T, exceto no 5º corte, quando C foi equivalente à adubação Q.

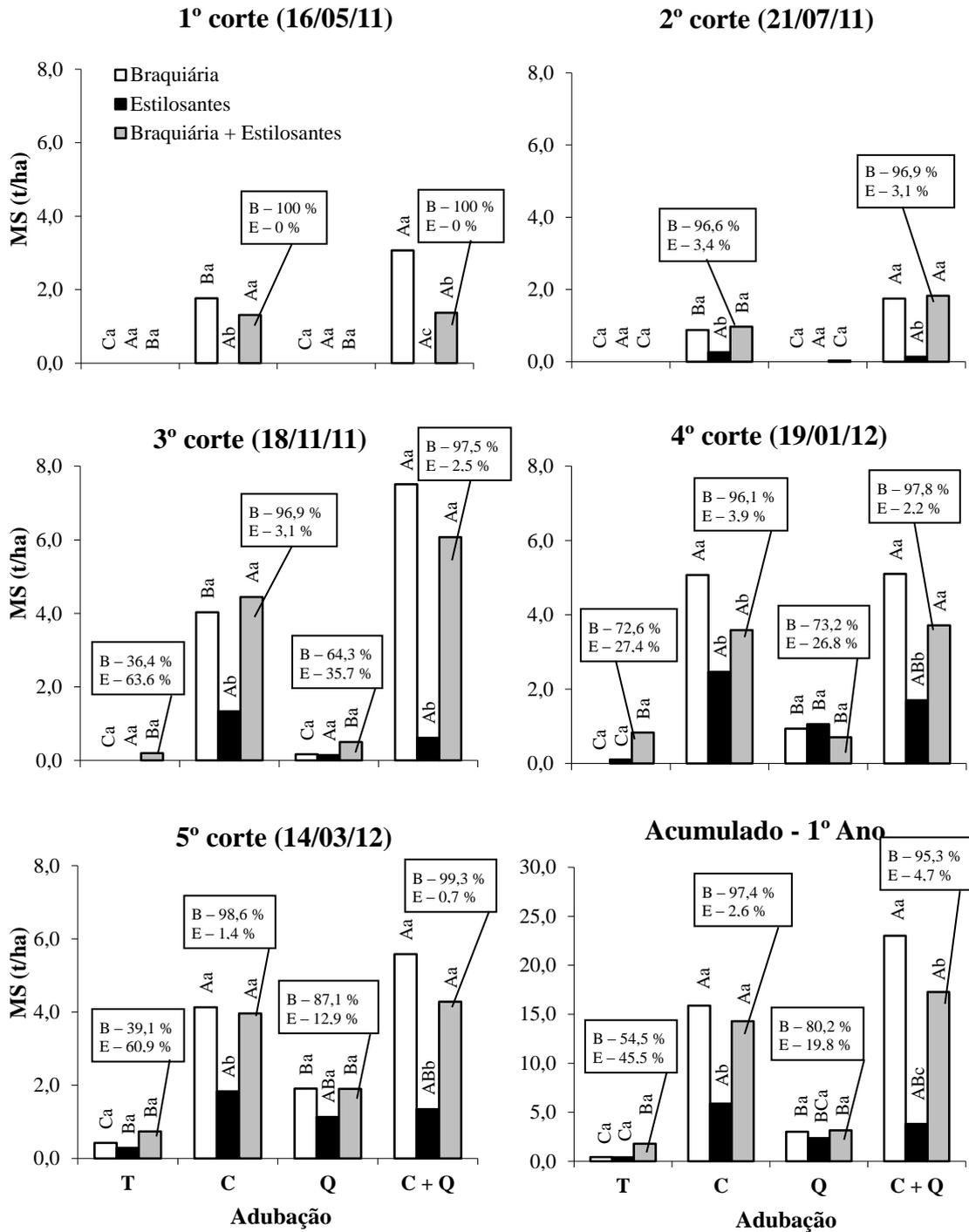


Figura 3: Produção de matéria seca (MS) da parte aérea de plantas de cobertura intercalares aos 60 (1º corte), 126 (2º corte), 246 (3º corte), 309 (4º corte) e 364 (5º corte) dias após semeadura e acumulada durante o primeiro ano de crescimento (15/03/11 a 14/03/12), sob diferentes adubações em área em recuperação com cultivo de cafeeiro após mineração de bauxita. Os percentuais referem-se à proporção da MS total produzida pela braquiária (B) e pelo estilosantes (E) no tratamento de consórcio braquiária + estilosantes. C = adubação orgânica com cama de aviário; Q = adubação química; T = testemunha (sem adubação); Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro cada tipo de planta de cobertura, e minúscula dentro de cada tipo de adubação, não diferem a 10 % pelo teste Tukey.

O efeito da adubação Q foi equivalente ao da T na produção de MS de todas as plantas de cobertura até o 3º corte. A partir do 4º corte e no acumulado, a adubação Q aumentou a produção de MS da braquiária em monocultivo, mas não para o consórcio B+E e para o E, exceto no 4º corte para este último. No entanto, a MS produzida pelo estilosantes na adubação Q não diferiu daquela produzida na adubação C+Q em nenhum dos cortes e no acumulado.

A produção de MS no consórcio B+E não diferiu da produção da braquiária em monocultivo na maioria das adubações e cortes realizados, exceto no 1º corte e no acumulado, com a adubação C+Q e também com a adubação C no 4º corte. Também não houve diferença na produção de MS da B e do consórcio B+E em relação ao estilosantes nas adubações Q e T. Porém, a braquiária e o consórcio B+E tiveram maiores produções de MS do que o estilosantes em todos os cortes onde foram aplicadas as adubações C e C+Q.

A proporção de MS produzida pelo estilosantes no consórcio B+E nas adubações C e C+Q foi sempre inferior a 5 % do total (Figura 3). No entanto, na testemunha e na adubação Q a contribuição relativa do estilosantes foi maior, variando em função dos cortes. No total acumulado do período, a contribuição foi de 45,5 % (0,81 t/ha) na testemunha e de 19,8 % (0,62 t/ha) na adubação química. Isso demonstra maior tolerância do estilosantes a solos com menor disponibilidade de nutrientes comparado à braquiária (EMBRAPA, 2007).

Apesar da proporção da biomassa produzida pelo estilosantes ser relativamente pequena, principalmente nas adubações C e C+Q, a braquiária parece ter se beneficiado do consórcio, pois não houve diferença entre as produções de MS da braquiária em monocultivo e do consórcio. No entanto, não é possível afirmar com certeza tal efeito, pois o maior número de plantas por área no tratamento com a braquiária em monocultivo também pode ter provocado uma maior competição entre plantas em comparação ao consórcio, onde foi usada a metade da quantidade de sementes de braquiária.

A braquiária apresentou elevada demanda de nutrientes para suportar sua alta taxa de crescimento nos primeiros meses, principalmente quando cultivada isolada (B) nas entrelinhas do cafeeiro. Isto pode ser observado pela maior produção de MS com o uso da adubação C+Q em relação a C até o 3º corte (Figura 3), indicando que a taxa de mineralização da cama de aviário, neste período, pode não ter sido alta o suficiente para fornecer os nutrientes que permitissem o máximo crescimento inicial

da gramínea. No entanto, com o tempo (a partir do 4º corte), a mineralização da cama de aviário, e também a ciclagem de nutrientes da fitomassa produzida nos cortes anteriores, foi capaz de fornecer condições para manter o crescimento da gramínea. Isto pode ser observado pela falta de diferença significativa ($p > 0,1$) entre a produção de MS da braquiária (B) nas adubações C e C+Q a partir do 4º corte e no acumulado do período (Figura 3).

Trabalhos utilizando o estilosantes como planta de cobertura em cafeeiro são escassos. Em um dos poucos trabalhos utilizando a espécie *Stylosanthes guianensis* como adubo verde em cafeeiro em dois locais na Zona da Mata de Minas Gerais, Matos et al. (2008) observaram produção de cerca de 2,8 t/ha de MS após 120 dias do plantio, sendo esta a planta de cobertura com maior produção de MS na localidade de Pedra Dourada, MG. No entanto, os autores observaram que em Araponga a mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum*) apresentou maior produção (cerca de 3,2 t/ha), atribuindo as diferenças devido às condições de altitude e clima entre as regiões.

Outras leguminosas também têm sido utilizadas como planta de cobertura apresentando boa produção de fitomassa e contribuindo para o crescimento do cafeeiro. Paulo et al. (2001) avaliando a produção de fitomassa de diferentes leguminosas e o efeito sobre o crescimento do café conilon com a incorporação da fitomassa ao solo encontraram produções médias anuais de 38, 32, 10, 8 e 4 t/ha de MS de *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*, *Stizolobium deeringeanum*, *Glycine max* e *Crotalaria spectabilis*, respectivamente, sendo que as duas primeiras reduziram a produção do cafeeiro. Ricci et al. (2005) obtiveram produção de 16 t/ha de MS de *Crotalaria juncea* como planta de cobertura em cafeeiro Catuaí vermelho, após 176 dias do plantio, em Valença, RJ, e observaram que a leguminosa aumentou o crescimento em altura do cafeeiro e promoveu aporte de mais de 200 kg/ha de N.

3.2. Extração de nutrientes pelas plantas de cobertura intercalares

Houve interação significativa ($p < 0,05$) entre os tipos de adubações e os tipos de plantas de cobertura sobre a quantidade de todos os nutrientes extraídos pela fitomassa das plantas de cobertura (Figura 4).

De modo geral, as quantidades de todos os nutrientes extraídos pela braquiária foram maiores nas adubações C e C+Q (Figura 4). Na adubação C+Q, os

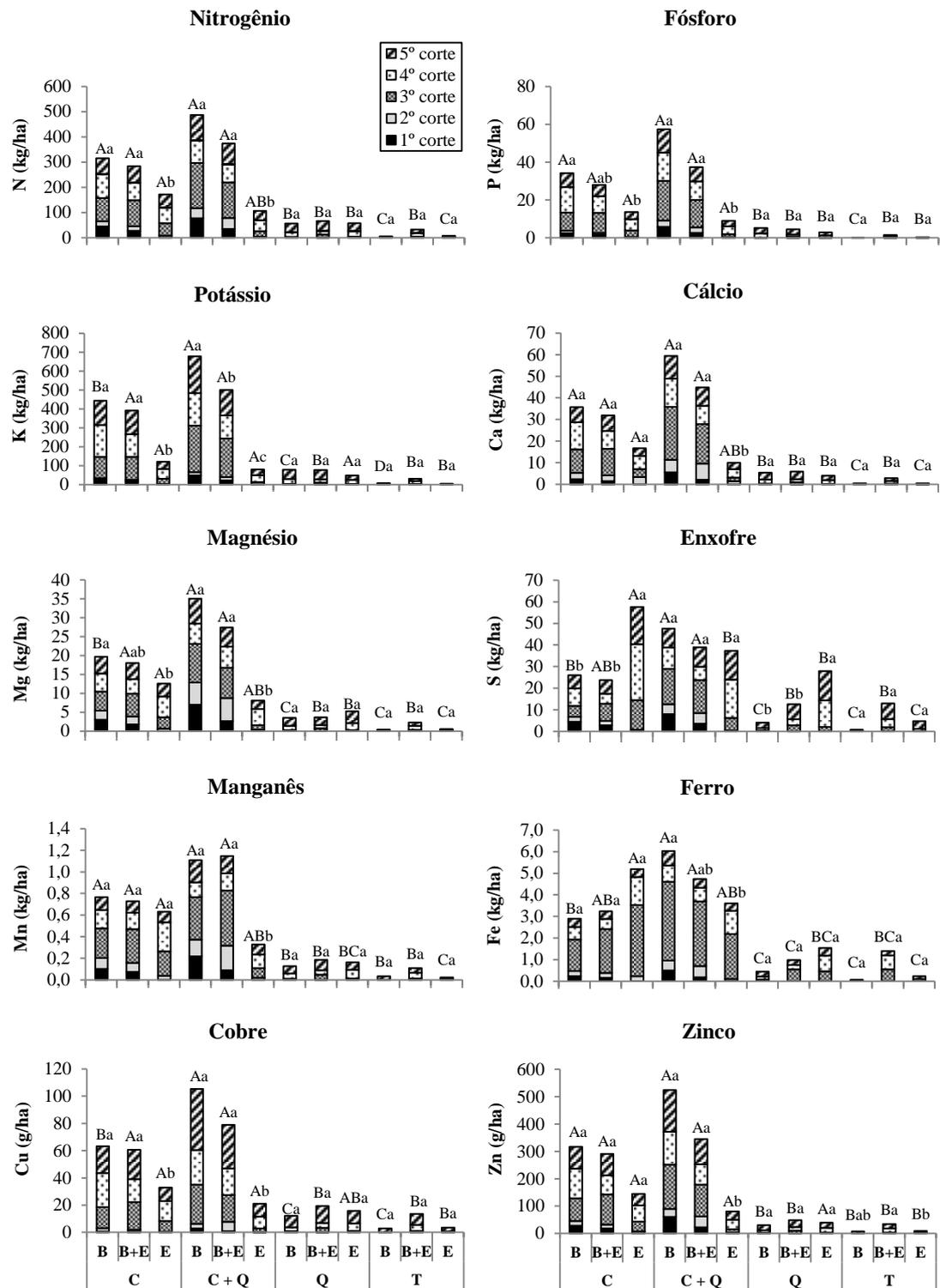


Figura 4: Quantidades médias de macro e micronutrientes por hectare extraídos pela parte aérea de plantas de cobertura intercalares aos 60 (1° corte), 126 (2° corte), 246 (3° corte), 309 (4° corte) e 364 (5° corte) dias após plantio (15/03/11 a 14/03/12), sob diferentes adubações em área em recuperação após mineração de bauxita com cultivo de cafeeiro. C = adubação com cama de aviário; Q = adubação química; T = testemunha (sem adubação); B = braquiária; E = estilosantes. Letras maiúsculas comparam as médias acumuladas nos cinco cortes de adubação dentro de cada tipo de planta de cobertura e minúsculas comparam plantas de cobertura dentro de cada tipo de adubação pelo teste Tukey a 10 %.

nutrientes K, Mg, S, Fe e Cu foram extraídos em maiores quantidades pela braquiária do que na adubação C, não havendo diferenças entre essas adubações para os demais nutrientes. A adubação Q aumentou somente a extração dos nutrientes N, P, K e Ca em relação à T.

Quanto ao efeito das adubações sobre a extração de nutrientes pelo consórcio B+E, não houve diferença ($p > 0,1$) entre as adubações C e C+Q e também entre as adubações Q e T para todos os nutrientes. As adubações C e C+Q foram superiores à adubação Q para todos os nutrientes, exceto para o S, que não diferiu entre as adubações C e Q.

No estilosantes, maiores extrações de todos os nutrientes, exceto K, Cu, e Zn, foram observadas na adubação C em relação à adubação Q, e de S em relação à adubação C+Q. A adubação C+Q aumentou somente a extração de P pelo estilosantes em relação à Q. Não houve diferença nas quantidades de P, Mn, Fe e Zn extraídas pelo estilosantes entre as adubações Q e T.

Quanto às diferenças entre as plantas de cobertura, as quantidades de todos os nutrientes extraídos pela braquiária não diferiram daquelas extraídas no consórcio B+E, exceto na adubação C+Q, onde as quantidades de K extraídas pela braquiária foram maiores, provavelmente provenientes das adubações de cobertura realizadas na linha de plantio do cafeeiro (Tabela 3). Quanto ao estilosantes, este não diferiu da braquiária nas quantidades extraídas de: Ca, Mn, Fe e Zn na adubação C; de S na adubação C+Q e; de todos os nutrientes nas adubações T e Q (exceto S). Em relação ao consórcio B+E, o estilosantes extraiu maiores quantidades de S nas adubações C e Q. Porém, não foram observadas diferenças entre o estilosantes e o consórcio nas quantidades extraídas de: P, Ca, Mg, Mn, Fe e Zn na adubação C; de S e Fe na adubação C+Q e; de todos os nutrientes nas adubações T (exceto Zn) e Q (exceto S).

As maiores quantidades de nutrientes extraídos pelas plantas de cobertura B e B+E nas adubações C e C+Q são condizentes com as maiores quantidades de nutrientes adicionados ao solo (Tabela 2) e com a maior produção de fitomassa (Figura 3). No entanto, as quantidades de S extraídas pelo estilosantes foram sempre superiores ou equivalentes àquelas extraídas pelas plantas de cobertura B e B+E, apesar destas apresentarem produções de fitomassa superiores ao estilosantes, indicando uma grande demanda e capacidade de absorção desse nutriente pela leguminosa.

No consórcio B+E, a proporção de contribuição do estilosantes na extração e, conseqüentemente, na ciclagem de nutrientes nas adubações C e C+Q foi relativamente pequena (inferior a 10 % para a maioria dos nutrientes nos cinco cortes) (Figura 5). No entanto, nas parcelas com menor aporte de nutrientes via adubação (adubações Q e T), o estilosantes passou a ter maior contribuição, sendo uma importante reserva de nutrientes para ciclagem. O estilosantes Campo Grande possui boa adaptação a solos pobres e, quando cultivado em consórcio em solos mais férteis, seu desenvolvimento pode ser prejudicado pela competição com a braquiária (EMBRAPA, 2007).

A braquiária demonstrou grande capacidade de produção de MS e acúmulo de nutrientes, tanto isolada, quanto em consórcio, assim como nos resultados encontrados por Torres et al. (2005) e Costa et al. (2010). Segundo Torres et al. (2008), o tempo de meia-vida da fitomassa e dos nutrientes N, P, K, Ca e Mg acumulados na fitomassa de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu foi de 56, 53, 117, 25, 11 e 18 dias, respectivamente. Monteiro et al. (2002) também alegam que a braquiária constitui material de fácil decomposição, apesar da alta relação C:N e do teor de polifenóis elevado. Desta forma, observa-se que grande parte dos nutrientes presentes na biomassa são reciclados rapidamente, podendo estar disponíveis para o cafeeiro já no primeiro ano. No entanto, a imobilização de N durante o processo de decomposição pode reduzir a disponibilidade deste nutriente, principalmente na fase inicial (Teixeira et al., 2009). Neste sentido, no consórcio com leguminosas fixadora de N₂, o aporte de material mais rico em N pode reduzir tal efeito de imobilização melhorando a ciclagem deste e de outros nutrientes com conseqüente benefício ao cafeeiro.

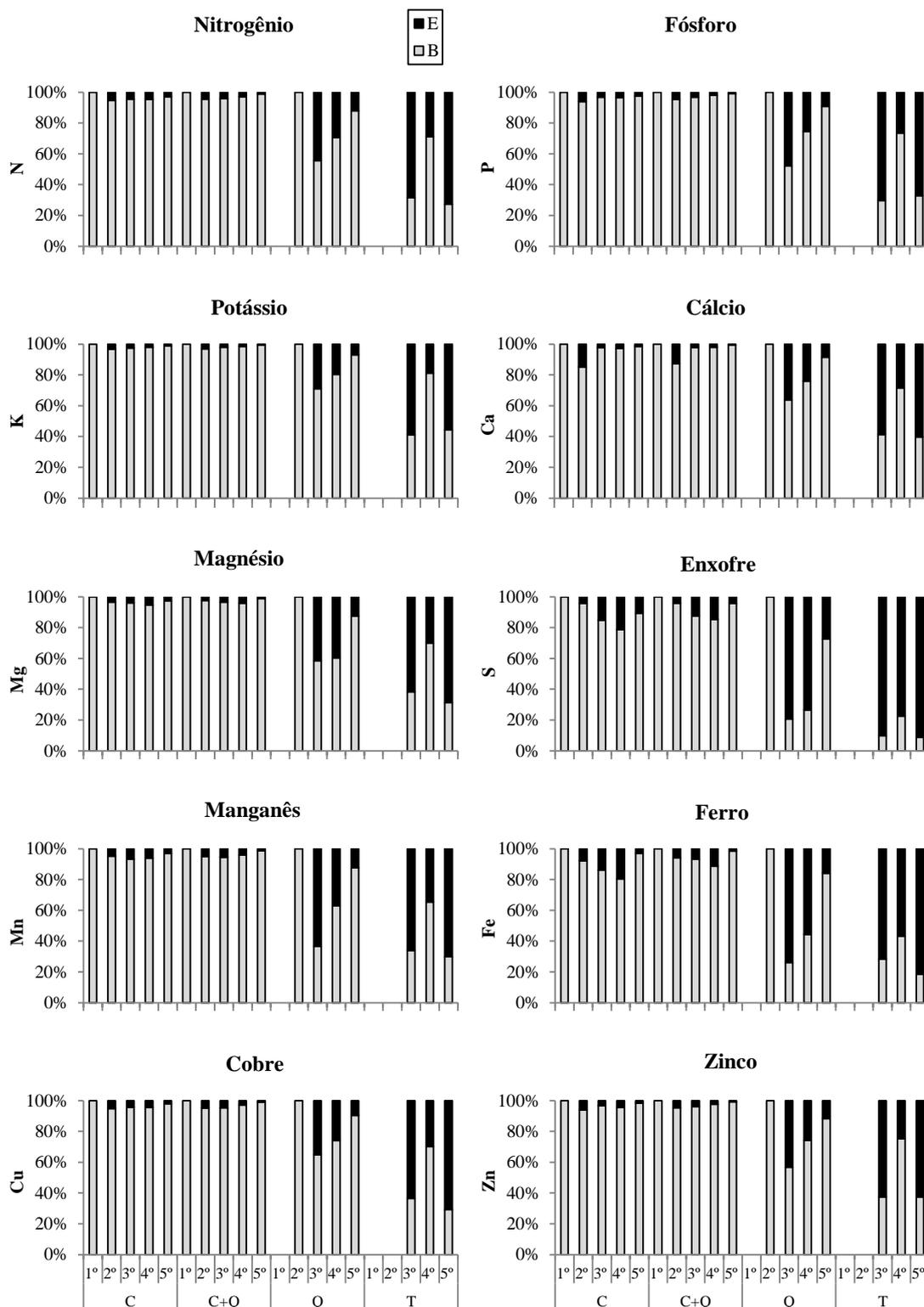


Figura 5: Contribuição relativa média da braquiária e do estilosantes na extração de macro e micronutrientes pela parte aérea das plantas no tratamento de consórcio (B + E) como planta de cobertura intercalar em cultivo de cafeeiro, aos 60 (1º corte), 126 (2º corte), 246 (3º corte), 309 (4º corte) e 364 (5º corte) dias após plantio (15/03/11 a 14/03/12), sob diferentes adubações em área em recuperação após mineração de bauxita. C = adubação com cama de aviário; Q = adubação química; T = testemunha (sem adubação); B = braquiária; E = estilosantes.

3.3.Crescimento do cafeeiro

Houve interação significativa entre os tipos de adubação e de plantas de cobertura intercalares sobre a altura ($p < 0,05$) e sobre o número de nós em ramos plagiotrópicos ($p < 0,01$) do cafeeiro. No entanto, não houve interação sobre o diâmetro do caule e o número de ramos plagiotrópicos ($p > 0,1$).

Todas as adubações aplicadas apresentaram efeito positivo sobre as características de crescimento avaliadas no cafeeiro em relação à testemunha (Figura 6). Na testemunha sem adubação, a limitação de nutrientes tornou mais intensa a competição por nutrientes entre o cafeeiro e as plantas de cobertura intercalares, havendo o aparecimento de sintomas de deficiência nutricional no cafeeiro, principalmente com o uso da braquiária em monocultivo como planta de cobertura intercalar (Figura 7).

De modo geral, as adubações C, C+Q e Q apresentaram o mesmo efeito sobre o DC, o número de ramos plagiotrópicos e o número de nós, exceto quando foi usada B+E como planta de cobertura (Figura 6). Este tipo de planta de cobertura promoveu aumento do número de nós dos ramos do cafeeiro na adubação Q em relação à C+Q, porém sem diferir da adubação C.

Quanto ao efeito da adubação sobre a altura das plantas, houve resposta variada dependendo da planta de cobertura. Onde foi usado o estilosantes como planta de cobertura, as adubações C, C+Q e Q apresentaram os mesmos efeitos. Já nas parcelas sem planta e também naquelas com consórcio B+E, as alturas foram maiores nas adubações C e C+Q comparadas à Q. Porém, nas parcelas com braquiária (B), não houve diferença entre as adubações C e Q.

As adubações C e C+Q apresentaram o mesmo efeito sobre as características de crescimento do cafeeiro, indicando que a cama de aviário isolada, nas quantidades utilizadas neste estudo, foi capaz de fornecer nutrientes em quantidades suficientes para manter o crescimento do cafeeiro durante os primeiros 21 meses após o plantio. Isto representa vantagem econômica, uma vez que dispensaria gastos com aquisição de calcário e fosfato natural, bem como com mão-de-obra para aplicação dos insumos. No entanto, é preciso levar em consideração o curto período de avaliação, comparado ao tempo do ciclo de vida do cafeeiro, demandando avaliações futuras sobre a sustentabilidade do crescimento e da produção ao longo dos anos.

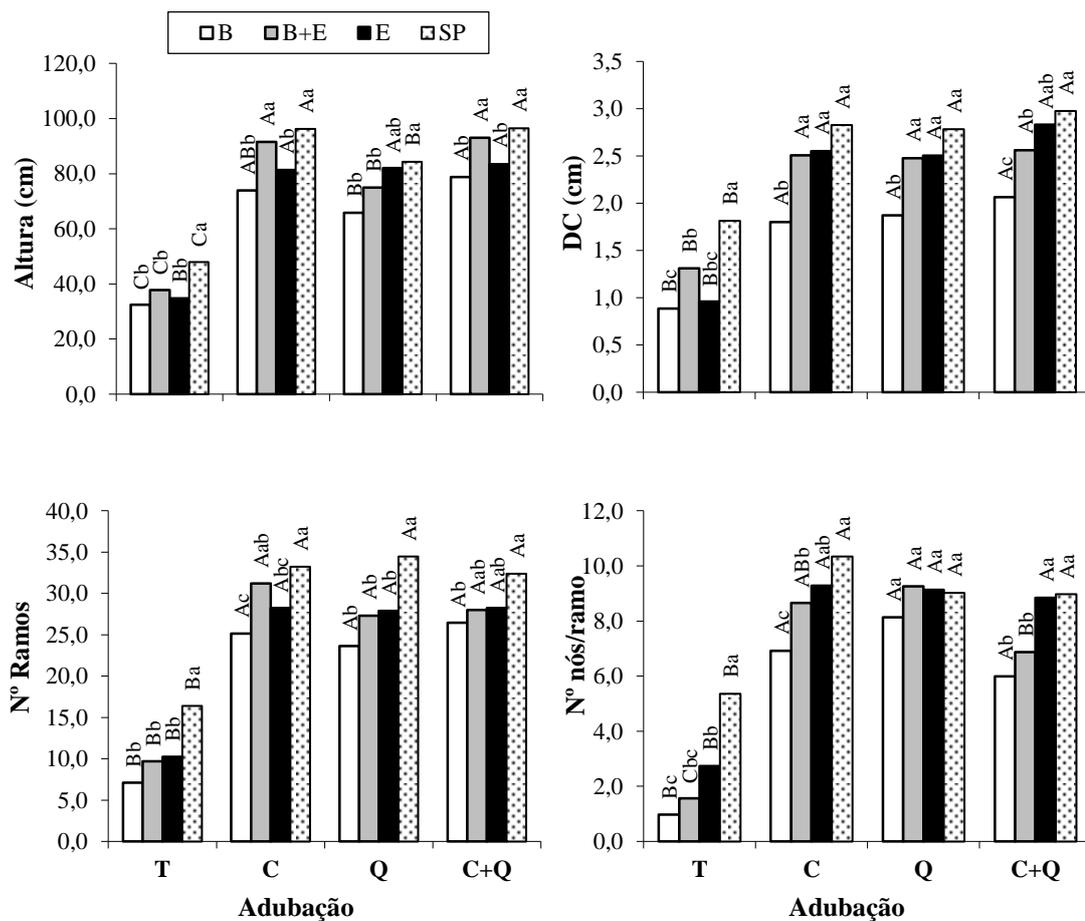


Figura 6: Médias das alturas, diâmetro de coleto (DC), número de ramos plagiotrópicos e de nós por ramo na altura média de plantas de cafeeiro após 21 meses de crescimento (01/02/11 a 01/11/12), cultivado com diferentes adubações e plantas de cobertura intercalares sobre áreas em recuperação após mineração de bauxita. C = adubação orgânica com cama de aviário; Q = adubação química; T = testemunha (sem adubação); B = braquiária; E = estilosantes; SP = sem planta de cobertura. Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro cada tipo de planta de cobertura, e minúscula dentro de cada tipo de adubação, não diferem a 10 % pelo teste Tukey.

Quanto ao efeito das plantas de cobertura sobre o crescimento do cafeeiro, a resposta variou em função da planta de cobertura, do tipo de adubação e da característica avaliada. Contudo, nenhuma das plantas de cobertura provocou aumento no crescimento do cafeeiro, sendo que em algumas situações houve efeito competitivo negativo. No entanto, é preciso considerar que efeitos benéficos das plantas de cobertura podem ainda não terem aparecido devido à necessidade de tempo mais longo para que ocorra a ciclagem de nutrientes e o aporte de matéria orgânica ao solo pelas plantas de cobertura.

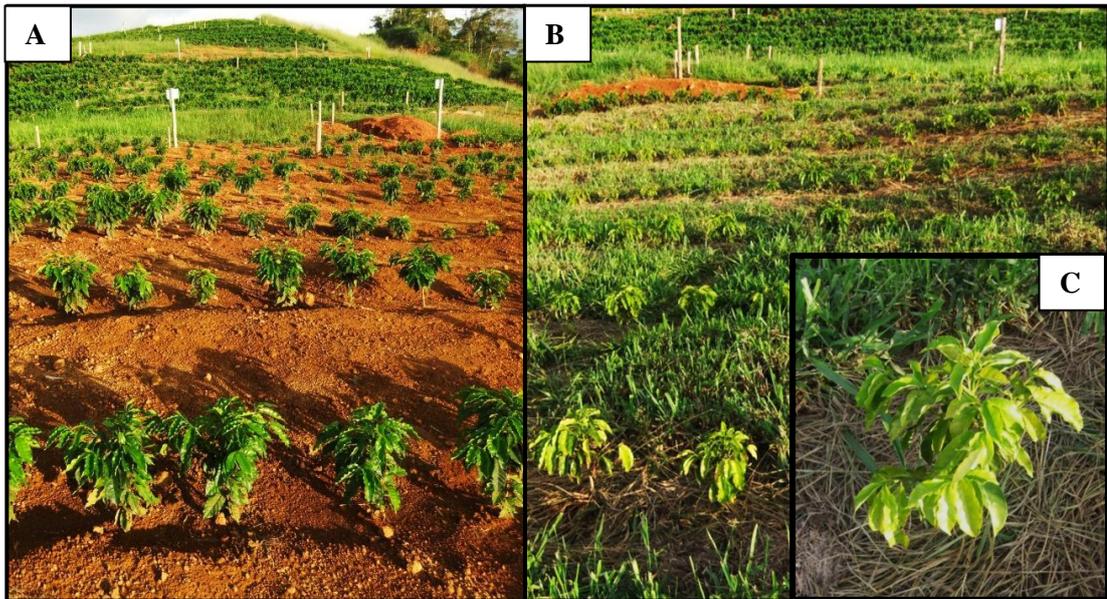


Figura 7: Cafeeiro em parcelas sem adubação (testemunha) e sem planta de cobertura intercalar (A) e com braquiária (B) apresentando sintomas de deficiência nutricional (amarelecimento). C) detalhe de planta com deficiência acentuada em parcela com braquiária na entrelinha.

A braquiária em monocultivo (B) foi a planta de cobertura que mais reduziu o crescimento do cafeeiro, independente da adubação utilizada, apresentando efeito negativo sobre todas as características avaliadas em relação às parcelas sem planta, exceto sobre o número de nós, quando utilizou-se a adubação química (Figura 6).

De modo geral, as plantas de cobertura B+E e E apresentaram efeitos semelhantes sobre o crescimento do cafeeiro, com algumas variações dependendo da adubação utilizada e da característica em estudo. Quando se utilizou a adubação com cama de aviário, o consórcio B+E apresentou efeito semelhante à SP sobre a altura, diâmetro do caule e número de ramos, e reduziu o número de nós. Enquanto isso, nesta adubação, o estilosantes reduziu a altura e o número de ramos, sem afetar o diâmetro do caule e o número de nós. Somente a altura das plantas de cafeeiro foi superior no consórcio B+E em relação ao E.

Nas parcelas com adubação química, tanto o consórcio B+E, quanto o estilosantes tiveram efeitos semelhantes à SP sobre o diâmetro do caule e número de nós, e ambos reduziram o número de ramos. No entanto, o consórcio B+E também reduziu a altura do cafeeiro, o que não ocorreu com o uso do estilosantes. Já onde foi utilizada a adubação C+Q, o efeito do estilosantes foi semelhante à SP sobre as características diâmetro do caule, número de nós e número de ramos, porém reduziu

a altura das plantas. Quanto ao consórcio B+E, houve redução do diâmetro do caule e número de nós. Na adubação C+Q, também houve aumento do número de nós e redução da altura das plantas onde foi utilizado o estilosantes como planta de cobertura, comparados ao consórcio B+E.

Souza et al. (2006) afirmam que lavouras de café em formação são muito suscetíveis à interferências de plantas daninhas, principalmente se muito próximas da linha de plantio, que podem reduzir o crescimento e comprometer a produtividade dos cafeeiros. Estes mesmos autores verificaram que, quando existe *Brachiaria decumbens* na entrelinha do cafeeiro durante os 20,5 meses após o plantio em campo, é necessário manter uma faixa livre de plantas de 1,0 m de cada lado da linha de plantio para que não haja redução no crescimento em altura e no diâmetro do caule. Seguindo tal recomendação, com o espaçamento utilizado no presente estudo (2,0 x 0,5 m), só seria permitido implantar uma linha de plantio da braquiária como planta de cobertura no centro da entrelinha do cafeeiro para que não houvesse competição entre a braquiária e o cafeeiro.

Segundo Friessleben et al. (1991) e Souza et al. (2006) o diâmetro do coleto do cafeeiro é um dos melhores indicadores da competição das plantas na entrelinha com a cultura principal. Neste sentido, o estilosantes utilizado isolado ou em consórcio seria promissor como planta de cobertura para ser utilizado nas entrelinhas do cafeeiro sobre áreas mineradas de bauxita, principalmente quando adubado com C ou Q, por não reduzir o DC das plantas. Porém, é preciso levar em consideração que o estilosantes apresenta crescimento inicial lento (Figura 3), o que desfavoreceria o controle da erosão nos primeiros meses após o plantio. Além disso, o estilosantes apresentou baixa produção de fitomassa quando consorciado, naquelas adubações que promovem o maior crescimento da braquiária (C e C+Q), provavelmente por não tolerar a alta competitividade da gramínea. Assim, o consórcio da braquiária com leguminosas em áreas mineradas precisa ser melhor avaliado em estudos futuros, avaliando-se também outras espécies de leguminosas que têm se mostrado promissoras (Chaves et al., 1997; Paulo et al., 2001; Ricci et al., 2005; Vilela et al., 2011), aliando a alta produção de fitomassa e o controle de processos erosivos pela braquiária com o aporte de N pela fixação biológica da leguminosa.

Os resultados de crescimento do cafeeiro sobre áreas mineradas de bauxita obtidos no presente estudo foram próximos aos obtidos por Andrade et al. (2007) para altura (110 cm) e DC (2,5 cm) utilizando a mesma variedade, espaçamento e

época de avaliação em cultivo convencional no município de Bom Jesus do Itabapoana, RJ. Da mesma forma, Andrade et al. (2011) encontraram, para a mesma variedade, valores de altura de 81 cm e de 12 nós/ramo em cafeeiro de 18 meses após plantio sob fertirrigação na região do Alto Paranaíba, MG. Isto demonstra que o crescimento de cafeeiro sobre áreas mineradas de bauxita na Zona da Mata Mineira pode ser viável, desde que utilizadas adubações e plantas de cobertura intercalares adequadas.

3.4. Perdas de água e solo por escoamento superficial

As maiores perdas de água ocorreram nos meses de maior precipitação, principalmente nos tratamentos sem cobertura do solo (Figura 8). A adubação orgânica contribuiu para diminuir significativamente ($p < 0,1$) as perdas totais de água e solo por escoamento superficial em relação à adubação química (Tabela 4). Onde a braquiária foi adubada com cama de aviário (CB), as perdas de água e solo foram aproximadamente $\frac{1}{4}$ daquelas registradas na braquiária com adubação química (QB). A adubação orgânica melhorou o crescimento inicial da braquiária (Figura 3) permitindo uma rápida cobertura do solo, o que evita o impacto direto das gotas de chuva e serve como barreira ao escoamento superficial. Além disso, o sistema radicular volumoso e agressivo da braquiária contribuiu para melhorar a estrutura física do solo, o que aumenta a estabilização do solo e a infiltração de água (Lunardi Neto, 2008; Andrade et al., 2009; Calonego et al., 2011).

Mesmo nas parcelas sem planta de cobertura, a adubação orgânica contribuiu significativamente para reduzir as perdas de água (redução de 65,6 %) e de solo (redução de 58,0 %). O conteúdo de MOS e a atividade microbiana aumentam quando resíduos orgânicos são aplicados ao solo (Haynes e Naidu, 1998) e, normalmente, é de esperar que as propriedades físicas do solo também melhorem. Segundo Abiven et al. (2009) a MOS e compostos produzidos por microrganismos, como hifas e mucilagens, participam da agregação do solo funcionando como agentes ligantes das partículas minerais do solo. De fato, Yu et al. (2012) observaram que, com a aplicação de composto orgânico ao solo durante 18 anos na China, houve aumento da proporção de macroagregados, mas este efeito não foi tão claro com a aplicação de adubação mineral. Albiach et al. (2001) e Villar et al. (2004) também observaram efeitos positivos sobre agregação do solo com a aplicação de compostos

orgânicos. Assim, a adubação orgânica com cama de aviário no presente estudo pode ter favorecido a estabilização e estruturação do solo, melhorando a capacidade de infiltração de água e reduzindo as perdas de água e solo por escoamento superficial (Six et al., 2004).

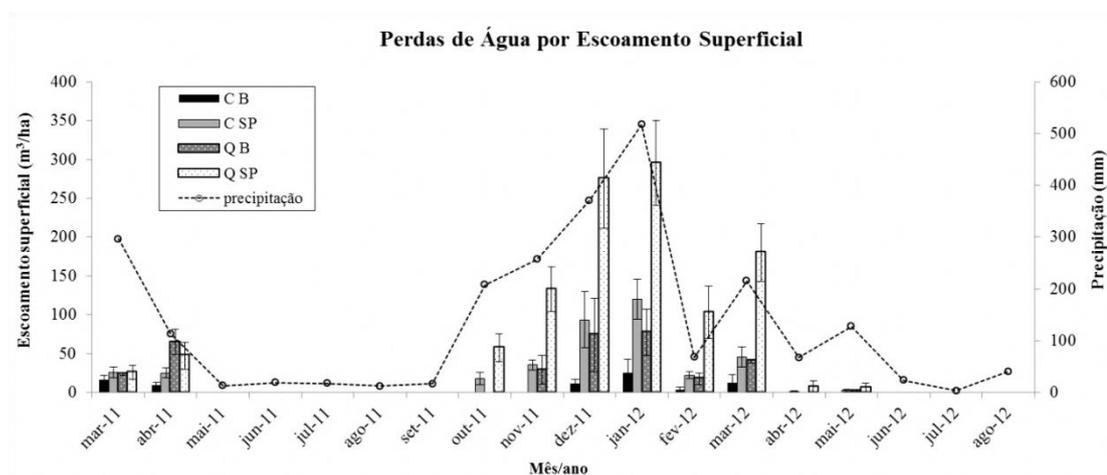


Figura 8: Média das perdas totais mensais de água por escoamento superficial e precipitação mensal, durante o período de março de 2011 a agosto de 2012, em área em recuperação após mineração de bauxita com cultivo de café, sob diferentes tipos de adubação e plantas de cobertura intercalares. CB – braquiária e adubação com cama de aviário; CSP – adubação com cama de aviário e sem cobertura do solo; QB – braquiária e adubação química do solo; QSP - adubação química e sem cobertura do solo. Barras verticais indicam o erro padrão das médias (n = 3).

Tabela 4: Médias das perdas acumuladas de água e solo e porcentagem da precipitação perdida por escoamento superficial, durante o período de março de 2011 a agosto de 2012, em área em recuperação após mineração de bauxita com cultivo de café, sob diferentes tipos de adubação e plantas de cobertura intercalares

Precipitação Acumulada (mm)	Adubação	Planta de Cobertura	Escoamento (m³/ha)	% da precipitação perdida	Perda de solo (t/ha)
2.390,58	C	B	79,09 ^{Bb}	0,33	2,26 ^{Bb}
		SP	389,40 ^{Ba}	1,63	12,31 ^{Ba}
	Q	B	330,04 ^{Ab}	1,38	9,40 ^{Ab}
		SP	1.132,44 ^{Aa}	4,74	29,38 ^{Aa}

C - cama de aviário; Q – adubação química; B – braquiária; SP – sem planta de cobertura intercalar. Letras maiúsculas comparam adubação dentro de cada tipo de cobertura do solo e letras minúsculas comparam cobertura do solo dentro de cada adubação a 10 % pelo teste F.

Estudos que avaliam as perdas de água e solo em áreas com cultivo de café, assim como em áreas mineradas, são escassos. Em um dos poucos trabalhos sobre o assunto em área com cultivo de café convencional, Prochnow et al.

(2005) encontraram perdas de solo médias anuais variando de 7,51 a 12,24 t/ha nos cinco primeiros anos de implantação da cultura, com diferentes espaçamentos de plantio e utilizando comprimento das parcelas coletoras de 50 m, no município de Pindorama, SP. Os autores concluíram que os menores valores de perdas de solo e de água (2 % da precipitação) foram encontrados nos espaçamentos mais adensados (3,0 x 1,0 m). Alguns estudos também têm sido conduzidos com outros usos do solo, sendo encontrados valores limites superiores aos encontrados no presente estudo. Martins et al. (2003) encontraram perdas médias de solo variando entre 0,04 a 41,83 t/ha ano e de água entre 45,5 a 1.559,8 m³/ha ano em áreas com eucalipto, mata nativa e sem cobertura em três tipos de solo no município de Aracruz, ES. Silva et al. (2005a) observaram perdas médias anuais de solo variando de 14,9 a 205,65 t/ha em dois tipos de solo em que foi realizada aração e gradagem e mantidos sem cobertura durante cinco anos no município de Lavras, MG.

4. CONCLUSÕES

A adubação com cama de aviário, isolada ou combinada com adubação química, aumenta a produção de matéria seca e a quantidade de nutrientes extraídos pelas plantas de cobertura. A produção de matéria seca e a quantidade de nutrientes extraídos por unidade de área não difere entre a braquiária isolada e no consórcio, e são maiores que a do estilosantes.

O estilosantes apresenta baixo crescimento em consórcio com braquiária quando adubado com cama de aviário, porém representa proporção significativa da fitomassa produzida e dos nutrientes extraídos em locais com menor disponibilidade de nutrientes.

As adubações com cama de aviário e química, isoladas ou combinadas, aumentam o crescimento do cafeeiro e, em geral, não diferem entre si. A braquiária em monocultivo nas entrelinhas reduz o crescimento do cafeeiro, e o estilosantes ou o consórcio braquiária-estilosantes, em média, não apresentam efeito positivo.

A braquiária reduz as perdas de água e solo por escoamento superficial, principalmente quando adubada com cama de aviário. A adubação com cama de aviário também reduz as perdas de água e solo em áreas sem planta de cobertura intercalar no cafeeiro.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIVEN, S.; MENASSERI, S.; CHENU, C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. **Soil Biol. Biochem.**, 41: 1-12, 2009.

ALBIACH, R.; CANET, R.; POMARES, F.; INGELMO, F. Organic matter components and aggregate stability after the application of different amendments to a horticultural soil. **Bioresource Technol.**, 76: 125-129, 2001.

ANDRADE, M. V. S. F.; RIBEIRO, J. G.; SILVA, T. O.; SILVA, M. A. A.; ARAÚJO, F. C.; ALMEIDA, W. L.; DRUMOND, L. C. D.; RONCHI, C. P. Crescimento vegetativo em diferentes genótipos de café arábica fertirrigados na região do Alto Paranaíba-MG. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DE CAFÉS DO BRASIL, 6. Vitória, 2009. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café, 2011. (CD-ROM).

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. SILVEIRA, P. M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. **R. Bras. Eng. Agric. Ambiental**, 13(4): 411-418, 2009.

ANDRADE, W. E. B.; FERREIRA, J. M.; PINTO, J. F.; SHIMOYA, A.; SILVA, V. R.; SANTOS, J. G. C. Análise do crescimento do cafeeiro Catuaí vermelho em sistema adensado no noroeste fluminense. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DE CAFÉS DO BRASIL, 5. Águas de Lindóia, 2007. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café, 2007. (CD-ROM).

ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **R. Bras. Ci. Solo**, 24: 857-865, 2000.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C., TEIXEIRA, J. P. F., FURLANI, P. R., GALLO, J. P. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 48 p. (Boletim Técnico 78).

CALONEGO, J. C.; BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C. intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. **R. Bras. Ci. Solo**, 35: 2183-2190, 2011.

CARNEIRO, M. A. C.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. SOARES, A. L. L. Carbono orgânico, nitrogênio total, biomassa e atividade microbiana do solo em duas cronossequências de reabilitação após a mineração de bauxita. **R. Bras. Ci. Solo**, 32: 621-632, 2008.

CARPIM, L. K.; ASSIS, R. L.; BRAZ, A. J. B. P.; SILVA, G. P.; PIRES, F. R.; PEREIRA, V. C.; GOMES, G. V.; SILVA, A. G. Liberação de nutrientes pela palhada de milho em diferentes estádios fenológicos. **R. Bras. Ci. Solo**, 32: 2813-2819, 2008.

CARVALHO, A. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; SOUSA JUNIOR, J. G. A.; VIVALDI, L. J. Decomposição de resíduos vegetais em Latossolo sob cultivo de milho e plantas de cobertura. **R. Bras. Ci. Solo**, 32: 2831-2838, 2008.

CHAVES, J. C. D.; GORRETA, R. H.; DEMONE, C. A.; CASANOVA JÚNIOR, G. V.; FANTIN, D. **O amendoim cavalo (*Arachis hypogaea*) como alternativa para cultivo intercalar em lavoura cafeeira.** Londrina: Instituto Agronômico do Paraná, 1997. 20 p. (Boletim Técnico, 55).

COSTA, K. A. P.; OLIVEIRA, I. P.; SEVERIANO, E. C.; SAMPAIO, F. M. T.; CARRIJO, M. S.; RODRIGUES, C. R. Extração de nutrientes pela fitomassa de cultivares de *Brachiaria brizantha* sob doses de nitrogênio. **Ci. Anim. Bras.**, 11(2): 307-314, 2010.

DANTAS, M. E.; NETTO, A. L. C. Resultantes geo-hidroecológicas do ciclo do cafeeiro (1780-1880) no Médio Vale do rio Paraíba do Sul: uma análise qualitativa. **Anuário Inst. Geociên.**, 19: 61-78, 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Cultivo e uso de estilozantes Campo Grande.** Campo Grande: EMBRAPA, 2007. 10 p. (Comunicado Técnico, 105).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solos.** 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 1997. 212 p.

FAVARETTO, N.; MORAES, A.; MOTTA, A. C.; PREVEDELLO, B. M. S. Efeito da revegetação e da adubação de áreas degradada na fertilidade do solo e nas características da palhada. **Pesq. Agropec. Bras.**, 35:289-297, 2000a.

FAVARETTO, N.; MORAES, A.; MOTTA, A. C.; PREVEDELLO, B. M. S. Efeito da revegetação e da adubação de áreas degradada na produção de matéria seca e na absorção de nutrientes. **Pesq. Agropec. Bras.** 35: 299-306, 2000b.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ci. Agrotec.**, 35(6): 1039-1042, 2011.

FRIESSLEBEN, U.; POHLAN, J.; FRANKI, G. The response of *Coffea arabica* L. to weed competition. **Café, Cacao Thecn.**, 35(1): 15-20, 1991.

HAYNES, R. J.; NAIDU, R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. **Nutr. Cycl. Agroecos.**, 51: 123-137, 1998.

KRÜMMELBEIN, J.; RAAB, T. Development of soil physical parameters in agricultural reclamation after brown coal mining within the first four years. **Soil Till. Res.**, 125: 109-115, 2012.

LUNARDI NETO, A.; ALBUQUERQUE, J. A.; ALMEIDA, J. A.; MAFRA, A. L.; MEDEIROS, J. C.; ALBERTON, A. Atributos físicos do solo em área de mineração de carvão influenciados pela correção da acidez, adubação orgânica e revegetação. **R. Bras. Ci. Solo**, 32: 1379-1388, 2008.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; MARQUES, J. J. G. S. M. Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas florestais na região de Aracruz (ES). **R. Bras. Ci. Solo**, 27: 395-403, 2003.

- MATOS, E. S.; MENDONÇA, E. S.; LIMA, P. C.; COELHO, M. S.; MATEUS, R. F.; CARDOSO, I. M. Green manure in coffee systems in the region of Zona da Mata, Minas Gerais: characteristics and kinetics of carbon and nitrogen mineralization. **R. Bras. Ci. Solo**, 32: 2027-2035, 2008.
- MONTEIRO, H. C. F.; CANTARUTTI, R. B.; NASCIMENTO JUNIOR, D.; REGAZZI, A. J.; FONSECA, D. M. F. Dinâmica de decomposição e mineralização de nitrogênio em função da qualidade de resíduos de gramíneas e leguminosas forrageiras. **R. Bras. Zootec.**, 31(3), 1092-1102, 2002.
- PAULO, E. M.; BERTON, R. S.; CAVICHIOLI, J. C. BULISANI, E. A.; KASAI, F. S. Produtividade do café apoaã em consórcio com leguminosas na região da Alta Paulista. **Bragantia**, 60: 195-199, 2001.
- PAVAN, M. A.; CHAVES, J. C. P.; MESQUITA FILHO, L. Manejo da adubação para a formação de lavouras cafeeiras. **Pesq. Agropec. Bras.** 21: 33-42, 1986.
- PROCHNOW, D.; DECHEN, S. C. F.; DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; VIEIRA, S. R. Razão de perdas de terra e Fator C da cultura do cafeeiro em cinco espaçamentos, em Pindorama (SP). **R. Bras. Ci. Solo**, 29: 91-98, 2005.
- RESENDE, L. A.; ROCHA, M. S.; FREITAS, G. B.; SANTOS, R. H. S. Uso racional da cama-de-frango na produção de alimentos pelos avicultores familiares da Zona da Mata Mineira. In: SIMPÓSIO DE EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA, 7. Viçosa, 2009. **Anais...** Viçosa: UFV, 2009. (CD-ROM).
- RICCI, M. S. F.; ALVES, B. J. R.; MIRANDA, S. C.; OLIVEIRA, F. F. Growth rate and nutritional status of an organic coffee cropping system. **Sci. Agric.**, 62(2): 138-144, 2005.
- ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S. Lixiviação de potássio da palha de espécies de cobertura de solo de acordo com a quantidade de chuva aplicada. **R. Bras. Ci. Solo**, 27: 355-362, 2003.
- SANTOS, J. C. F.; MARCHI, G.; MARCHI, E. C. S. **Cobertura do solo no controle de plantas daninhas do café**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2008. 56 p. (Documentos, 226).
- SCHWENKE, G. D.; MULLIGAN, D. R.; BELL, L. C. Soil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite-mined land at Weipa. I. Initial changes to soil organic matter and related parameters. **Austr. J. Soil Res.**, 38: 345-369, 2000.
- SHRESTHA, R. K.; LAL, R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. **Geoderma**, 161: 168-176, 2011.
- SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; LIMA, J. M.; AVANZI, J. C.; FERREIRA, M. M. Perdas de solo, água, nutrientes e carbono orgânico em Cambissolo e Latossolo sob chuva natural. **Pesq. Agropec. Bras.**, 40(12): 1223-1230, 2005a.
- SILVA, A. A. **Potencialidade da recuperação de pastagem de *Brachiaria decumbens* fertilizada com camas de aviário e fontes minerais**. Uberlândia: UFU, 2005b. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Veterinárias) – Universidade Federal de Uberlândia.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil Till. Res.**, 79: 7-31, 2004.

SOUZA, L. S.; LOSASSO, P. H. L.; OSHIWA, M.; GARCIA, R. R.; GOES FILHO, L. A. Efeitos das faixas de controle do capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*) no desenvolvimento inicial e na produtividade do cafeeiro (*Coffea arabica*). **Planta Daninha**, 24(4): 715-720, 2006.

TEIXEIRA, C. M.; CARVALHO, G. J.; ANDRADE, M. J. B.; SILVA, C. A.; PEREIRA, J. M. Decomposição e liberação de nutrientes das palhadas de milho e milho + crotalária no plantio direto do feijoeiro. **Ac. Sci. Agron.**, 31(4): 647-653, 2009.

THOMAZ, E. L.; The influence of traditional steep land agricultural practices on runoff soil loss. **Agric., Ecosys. Environ.**, 130: 23-30, 2009.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; FABIAN, A. J. Produção de fitomassa por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesq. Agropec. Bras.**, 43(3): 421-428, 2008.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J. C.; FABIAN, A. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de cerrado. **R. Bras. Ci. Solo**, 29: 609-618, 2005.

VILLAR, M. C.; PETRIKOVA, V.; DÍAZ-RAVIÑA, M.; CARBALLAS, T. Changes in soil microbial biomass and aggregate stability following burning and soil rehabilitation. **Geoderma**, 122: 73-82, 2004.

VILELA, E. F.; FREITAS, M. R. C.; PIANO, P. B.; SANTOS, R. H. S.; MENDONÇA, E. S. Crescimento inicial de cafeeiros e fertilidade do solo adubado com mucuna, amendoim forrageiro ou sulfato de amônio. **Coffee Sci.**, 6(1): 27-35, 2011.

YU, H.; DING, W.; LUO, J.; GENG, R.; CAI, Z. Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil. **Soil Till. Res.**, 124: 170-177, 2012.

WARD, S. C. Soil development on rehabilitation bauxite mines in south-west Australia. **Austr. J. Soil Res.**, v. 38, p. 453-464, 2000.

Capítulo IV

QUALIDADE DO SOLO DE ÁREAS MINERADAS DE BAUXITA EM RECUPERAÇÃO COM CAFEIEIRO SOB DIFERENTES ADUBAÇÕES E PLANTAS DE COBERTURA INTERCALARES

RESUMO

A mineração pode ser considerada uma das atividades mais impactantes ao solo, pois exige a retirada da vegetação e da camada de solo superficial, demandando a posterior recuperação da área com o mesmo tipo de uso pré-existente. Na Zona da Mata de Minas Gerais muitas das jazidas de bauxita se encontram sob cultivos agrícolas e, assim, surge o desafio de recuperar e monitorar a qualidade do solo (QS) e garantir o desenvolvimento sustentável de culturas agrícolas sobre essas áreas após a mineração. Os objetivos com este trabalho foram eleger um número mínimo de indicadores da QS e desenvolver um índice de qualidade do solo (IQS) para avaliar o impacto da mineração e o efeito de diferentes adubações e plantas de cobertura intercalares na recuperação de áreas mineradas de bauxita com cultivo de cafeeiro. Amostras de solo foram coletadas na camada de 0-20 cm em áreas que serviram como referências antes da mineração (mata nativa e com cultivo de cafeeiro de 10 anos de idade); e após seis meses da reconfiguração da área minerada. O experimento de recuperação foi instalado oito meses após a mineração e reconfiguração da área, avaliando-se o efeito da aplicação de quatro tipos de adubação: i) T - testemunha (sem adubação); ii) C - cama de aviário; iii) Q - adubação química; iv) C+Q - adubação química + cama de aviário. As mudas de *Coffea arabica* var. Catuaí vermelho foram plantadas no espaçamento 2,0 x 0,5 m e nas entrelinhas implantou-se quatro tipos de plantas como cobertura intercalar (PC): i) sem planta; ii) braquiária (B), iii) estilosantes (E), iv) consórcio braquiária-estilosantes (B+E). Após 19 meses da implantação, foram coletadas amostras de solo na camada de 0-20 cm para avaliação de 20 atributos divididos em orgânicos, químicos, físicos e microbiológicos. Análises univariadas (ANOVA e correlação) e multivariadas (análise de fatores) foram utilizadas para seleção e atribuição de pesos a um conjunto de indicadores da QS, que foram combinados em um IQS. Três fatores foram identificados, sendo que a depleção da matéria orgânica do solo e a disponibilidade de nutrientes foram os fatores identificados como mais sensíveis à mineração e aos tratamentos de recuperação. O carbono orgânico lábil (COL), a densidade do solo (Ds), a atividade da fosfomociferase ácida (FosAc) e a soma de bases (SB), foram selecionados como indicadores orgânicos, físicos, microbiológicos e químicos da QS, sendo que os três primeiros tiveram maior peso no IQS. A mineração reduziu em cerca de 65 % o IQS em relação ao cafeeiro não minerado. A adubação com cama de aviário, isolada ou combinada com a mineral, recuperou a QS, em média, em 23 % e as PC's contribuíram para recuperar a QS somente quando adubadas. As PC's apresentaram efeitos semelhantes sobre o IQS. Correlações positivas e significativas foram observadas entre o IQS e a produção de matéria seca da B ($r=0,96$), do E ($r=0,93$) e do consórcio ($r=0,92$) e também entre o IQS e a altura das plantas de cafeeiro ($r=0,68$), o número de ramos plagiotrópicos ($r=0,55$), o diâmetro do caule ($r=0,53$) e o número de nós ($r=0,43$). Conclui-se que um grupo mínimo de indicadores da QS pode ser composto pelo COL, a SB, a Ds e a FosAc e que o uso de cama de aviário, principalmente combinada com a adubação mineral, e de plantas de cobertura intercalares contribui para melhorar a QS de áreas mineradas

de bauxita em recuperação com o cafeeiro. O IQS baseado na análise de fatores para a seleção e ponderação dos indicadores da QS pode ser uma estratégia viável no monitoramento da recuperação de áreas mineradas de bauxita cultivadas com cafeeiro.

Palavras-chave: índice de qualidade do solo, indicadores de qualidade do solo, degradação do solo.

1. INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural vital para a manutenção da vida sobre a Terra, incluindo a do próprio homem. A expansão de áreas para a exploração de recursos naturais, devido ao aumento da população mundial, e o mau uso do solo pode levar à degradação acelerada do mesmo. Neste sentido, é fundamental a adoção de práticas que minimizem os impactos negativos e recuperem a qualidade dos solos.

A degradação do solo implica na redução da capacidade produtiva, resultante do uso intensivo, causando mudanças e promovendo alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas, estando as principais causas da degradação relacionadas a desmatamentos, métodos de cultivo, sistemas agrícolas, mineração, uso de agroquímicos etc. (Lal e Stewart, 1992). Portanto, a perda da qualidade do solo, além de um componente a ele inerente, determinado por suas propriedades físicas, químicas e biológicas, dentro das restrições impostas pelo clima e o ecossistema, inclui um componente determinado pelas decisões de uso da terra (tipo de exploração) e práticas de manejo (modo de exploração) (Doran e Zeiss, 2000).

A mineração pode ser considerada uma das atividades mais impactantes ao solo, embora no geral, não afete grandes extensões territoriais (Reis, 2006). Na região da Zona da Mata de Minas Gerais as jazidas de bauxita encontram-se principalmente sob florestas naturais, pastagens, plantios florestais e cultivos agrícolas, especialmente a cultura do café, pertencentes em sua maioria a pequenos e médios produtores. Para exploração de bauxita é necessária a retirada da vegetação e da camada de solo superficial, demandando a posterior recuperação da área com o mesmo tipo de uso pré-existente, sendo um compromisso legal, ambiental e social assumido pelas empresas mineradoras com os proprietários das terras. Assim, surge o desafio de recuperar e monitorar a qualidade do solo, profundamente alterada pela atividade de mineração, e garantir o desenvolvimento das culturas de forma viável a médio e longo prazo.

A qualidade do solo pode ser conceituada como “a capacidade desse recurso exercer várias funções, dentro dos limites do uso da terra e do ecossistema, para sustentar a produtividade biológica, manter ou melhorar a qualidade ambiental” (Doran e Parkin, 1994). Um dos desafios atuais da pesquisa é como avaliar a qualidade de um solo de maneira simples e confiável, uma vez que ela não pode ser medida diretamente. No entanto, o solo possui propriedades químicas, físicas e biológicas que interagem de maneira complexa, determinando sua qualidade e capacidade de uso. Dessa forma, ainda que sua qualidade não possa ser medida diretamente, ela pode ser inferida a partir das mudanças avaliadas nos seus atributos ou nos atributos do ecossistema, conhecidos como indicadores (Seybold et al., 1998).

A base científica que respalda a busca por indicadores de qualidade do solo é a compreensão de que esses indicadores devem ter a capacidade e a sensibilidade de avaliar processos no solo que o tornam um ambiente capaz de sustentar a vida (Dumanski e Pieri, 2000). Segundo Doran e Zeiss (2000), um bom indicador de qualidade do solo, deve ser sensível a variações no manejo; correlacionar-se com funções benéficas do solo; abranger processos do ecossistema, integrando propriedades físicas, químicas e biológicas do solo; ser acessível a diferentes usuários e aplicável em condições de campo e; ser de medição fácil e de baixo custo. Nesse sentido, percebe-se que nenhuma propriedade do solo deve ser usada isoladamente para se estimar a qualidade do solo (Stenberg, 1999; Mastro et al., 2008), devendo-se eleger um conjunto mínimo de indicadores para que sejam possíveis inferências sobre sua sustentabilidade.

Segundo Tótola e Chaer (2002), os trabalhos que avaliam o efeito de práticas de manejo ou de distúrbios sobre vários atributos do solo, buscando avaliar seu efeito sobre a qualidade do solo, muitas vezes são pouco conclusivos e de difícil interpretação, principalmente pelo grande volume de dados gerados. Neste sentido, a elaboração de índices de qualidade do solo (IQS) que integrem indicadores químicos, físicos e biológicos pode ser de grande utilidade e praticidade na interpretação dos resultados e direcionamento das técnicas de manejo (Andrews e Carrol, 2001; Sharma et al., 2005; Mastro et al., 2007). Desse modo, os IQS's poderiam se tornar parte dos programas de monitoramento da recuperação de áreas mineradas de bauxita, sendo uma estratégia de avaliação das práticas de recuperação e da sustentabilidade ambiental e social das atividades de mineração na região da Zona da Mata de Minas Gerais.

As práticas de manejo que adicionam ou mantêm carbono orgânico no solo parecem estar entre as mais importantes para restabelecer, manter ou melhorar a qualidade do solo (Karlen et al., 1994). Dentre estas práticas, a adubação orgânica pode trazer benefícios devido às melhorias das condições do solo para o desenvolvimento das plantas, como maior disponibilidade de nutrientes, aumento da CTC, melhor agregação, maior retenção de água e aumento do C do solo com consequente aumento da atividade microbiana, dentre outras (Andreola et al., 2000; Favaretto et al., 2000a,b; Carneiro et al., 2008). Na região da Zona da Mata de Minas Gerais, grandes quantidades de cama de aviário são geradas diariamente (Resende et al., 2009) criando um passivo ambiental para os avicultores e empresas integradoras. Assim, o uso deste resíduo como fertilizante em áreas mineradas precisa ser avaliado, podendo ser uma alternativa para solucionar um problema ambiental da região, e ainda proporcionar melhorias na qualidade do solo de áreas em recuperação com culturas agrícolas.

Outra prática utilizada para aumentar o aporte de matéria orgânica ao solo e que, conseqüentemente, pode melhorar a qualidade do solo em áreas com cultivo de café é o uso de plantas de cobertura intercalares nas entrelinhas (Ricci et al., 2005; Matos et al., 2008). Além de adicionar C ao solo, as plantas de cobertura intercalares podem trazer benefícios ao solo e à cultura principal por reduzirem processos erosivos, reter umidade, funcionar como adubos verdes, melhorar a ciclagem de nutrientes e reduzir infestação de daninhas, com consequentemente redução de custos com capinas (Pavan et al.; 1986; Paulo et al., 2001; Santos et al., 2008).

Neste contexto, para que se faça a recuperação de áreas degradadas pela mineração de bauxita de forma mais adequada, o desenvolvimento e avaliação de novas práticas de manejo do solo tornam-se fundamentais. Assim, este trabalho foi proposto com objetivo de eleger um número mínimo de indicadores da qualidade do solo abrangendo atributos orgânicos, químicos, físicos e microbiológicos e propor um IQS para avaliar o impacto da mineração e o efeito de diferentes adubações e plantas de cobertura intercalares na recuperação de áreas mineradas de bauxita com cultivo do café.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo e instalação do experimento

O estudo foi conduzido em condições de campo em propriedade localizada no município de São Sebastião da Vargem Alegre, na Zona da Mata de Minas Gerais, em área onde houve extração de bauxita, sob concessão da Companhia Brasileira de Alumínio – Votorantim Metais. O solo dominante na região é o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico.

A área escolhida para implantação do experimento de recuperação da área minerada se encontrava inicialmente com cultivo de cafeeiro de 10 anos de idade e foi minerada para bauxita nos anos de 2009 e 2010. O solo dessa área apresentava textura argilosa (450 g/kg de argila, 200 g/kg de silte e 350 g/kg de areia) na camada de 0-20 cm.

Após a mineração, a área foi reconfigurada, o que consistiu nas seguintes operações: o subsolo exposto durante a lavra foi descompactado com subsolador equipado com hastes de 0,6 m de comprimento, espaçadas 0,4 m, tracionado por trator de esteira D6. Em seguida, o solo decapeado (horizontes A e B que se encontravam acima do minério e que foram removidos no processo de lavra) e que estava amontoado em leiras (durante 15 meses) foi espalhado na área, numa camada de 0,4 a 0,6 m, com o auxílio de um trator de esteira. Novamente o terreno foi descompactado com subsolador equipado com hastes de 0,6 m de comprimento, espaçadas 0,4 m, tracionado por trator de esteira D6, com uma passada paralela ao declive do terreno, seguida de uma passada perpendicular. Finalmente, terraços em nível foram construídos, distribuídos ao longo da pendente do terreno. Esta área foi utilizada para instalação do experimento de recuperação e também serviu como referência da condição inicial após distúrbio (pós-reconfiguração) para comparações com o efeito dos tratamentos de recuperação. O solo desta área apresentava textura muito argilosa (630 g/kg de argila, 70 g/kg de silte e 300 g/kg de areia) na camada de 0-20 cm.

O experimento de recuperação com o cultivo do cafeeiro foi instalado oito meses após a reconfiguração da área minerada, utilizando o delineamento em blocos ao acaso, no esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. Os blocos experimentais foram alocados entre os terraços em nível. As parcelas principais mediam 28 m x 14 m e receberam os tratamentos com adubação no plantio (Tabela

1) que consistiram de: T - testemunha (sem adubação); C – adubação orgânica (50 t/ha (base seca) de cama de aviário, sendo 1/2 da dose aplicada no sulco de plantio e 1/2 a lanço na entrelinha); Q - adubação química (8 t/ha de calcário dolomítico com 80 % de PRNT, sendo 1/3 da dose no sulco de plantio e 2/3 na entrelinha; 1,5 t/ha de fosfato natural reativo Bayóvar aplicado no sulco de plantio e 0,70 t/ha aplicado a lanço na entrelinha; adubações em cobertura somente na linha de plantio, conforme Tabela 2); C+Q – adubação orgânica e química combinadas.

Tabela 1: Fontes e quantidades totais de nutrientes e carbono orgânico adicionados na implantação de cafeeiro e plantas de cobertura intercalares com diferentes adubações na recuperação de área minerada de bauxita

Tipo de Adubação	Local	Fonte	MS	COT	N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Fe	Cu	Zn
			----t/ha----		-----kg/ha-----									
<i>Orgânica (C)</i>	L	CA	25,0	8,8	605,4	235,0	578,9	531,6	91,4	123,3	8,3	188,6	1,3	7,0
	EL	CA	25,0	8,8	605,4	235,0	578,9	531,6	91,4	123,3	8,3	188,6	1,3	7,0
	Total (L + EL)			17,6	1.210,9	470,0	1.157,7	1.063,2	182,7	246,6	16,6	377,2	2,6	14,0
<i>Orgânica + Química (C+Q)</i>		Calcário	2,67	-	-	-	-	756,7	193,0	-	-	-	-	-
	L	CA	25,0	8,8	605,4	235,0	578,9	531,6	91,4	123,3	8,3	188,6	1,3	7,0
		FNR	1,5	-	9,9	195,1	1,6	483,0	5,3	20,3	0,1	0,1	0,0	0,1
		Total L		8,8	615,3	430,1	580,4	1.771,3	289,6	143,6	8,4	188,7	1,3	7,1
	EL	Calcário	5,33	-	-	-	-	1.513,1	385,9	-	-	-	-	-
		CA	25,0	8,8	605,4	235,0	578,9	531,6	91,4	123,3	8,3	188,6	1,3	7,0
FNR		0,70	-	4,6	91,0	0,7	225,4	2,5	9,5	0,0	0,0	0,0	0,1	
Total EL		8,8	610,1	326,0	579,6	2.270,1	479,7	132,8	8,3	188,6	1,3	7,1		
Total (L + EL)		17,6	1.225,4	756,1	1.160,0	4.041,4	769,3	276,3	16,7	377,3	2,6	14,2		
<i>Química (Q)</i>		Calcário	2,67	-	-	-	-	756,7	193,0	-	-	-	-	-
	L	FNR	1,5	-	9,9	195,1	1,6	483,0	5,3	20,3	0,1	0,1	0,0	0,1
		Total L		-	9,9	195,1	1,6	1.239,7	198,2	20,3	0,1	0,1	0,0	0,1
	EL	Calcário	5,33	-	-	-	-	1.513,1	385,9	-	-	-	-	-
		FNR	0,70	-	4,6	91,0	0,7	225,4	2,5	9,5	0,0	0,0	0,0	0,1
	Total EL		-	4,6	91,0	0,7	1.738,5	388,4	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Total (L + EL)		-	14,5	286,1	2,3	2.978,3	586,6	29,7	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2	
<i>Testemunha (T)</i>	Sem adubação													

CA = cama de aviário; L = linha de plantio do cafeeiro; EL = entrelinha; MS = massa seca; FNR = fosfato natural reativo (Fonte: Fertilizantes Heringer S.A)

Tabela 2: Adubações de cobertura aplicadas na linha de plantio do cafeeiro nos tratamentos Q e C+Q

Forma de adubação	Tipo de Adubo	Quantidade/ Aplicação	Unidade	Tempo após plantio
Via solo	N-P-K 08-28-16	100	g/planta	2 e 20 dias
	N-P-K 20-05-20	100	g/planta	11 meses
	KCl + 1% de Boro	100	g/planta	14 meses
Via foliar	Micronutrientes*	100	g/ha	2 meses
	Micronutrientes*	300	g/ha	4 meses
	Micronutrientes*	1.000	g/ha	11 meses
	Micronutrientes*	1.600	g/ha	19 meses

*Produto comercial Plantin II[®] (N:10,0; Ca: 1,5; Mg: 1,0; S: 3,5; Zn: 6,0; B: 3,0; Fe: 0,5; Mn: 0,5; Cu: 0,5; Mo: 0,05 %).

Cada parcela principal continha quatro subparcelas, medindo 14 m x 7 m, que receberam as plantas de cobertura intercalares: SP - sem planta de cobertura, mantendo a área limpa com aplicação de herbicida quando necessário; B – semeadura de braquiária (25 kg/ha de sementes viáveis de *Brachiaria brizantha*, cv. Piatã); E – semeadura de estilosantes (cv. Campo Grande, que é uma mistura de sementes de duas espécies: 80 % de *Stylosanthes capitata* e 20 % de *Stylosanthes macrocephala*, na dose de 2,5 kg/ha de sementes viáveis); B+E – consórcio braquiária-estilosantes (12,5 kg/ha de sementes viáveis de braquiária e 1,25 kg/ha de sementes viáveis de estilosantes).

Para o plantio das mudas de cafeeiro foram abertos sulcos, perpendiculares à declividade do terreno, com profundidade de 0,4 m e espaçados 2,0 m, utilizando equipamento mecanizado. Em seguida a cama de aviário foi aplicada manualmente, procedendo-se sua incorporação no sulco de plantio até a profundidade de 0,4 m e, na entrelinha na camada de 0-0,15 m. Em seguida, foi aplicado e incorporado o calcário nas parcelas dos respectivos tratamentos com adubação química (Q e C+Q). Após 30 dias da aplicação da cama de aviário e do calcário, foi efetuado, nos sulcos, o plantio das mudas de cafeeiro (*Coffea arabica*, var. Catuaí vermelho), na data de 01/02/2011, aplicando-se o fosfato natural no fundo do sulco naqueles tratamentos com adubação química. O espaçamento entre plantas na linha de plantio foi de 0,5 m, totalizando 392 plantas por parcela distribuídas em sete linhas de plantio.

Nas entrelinhas do cafeeiro foram semeadas manualmente, em 15/03/2011, as sementes de braquiária e estilosantes, em quatro sulcos de 0,02 m de profundidade e espaçados 0,25 m, cobrindo uma faixa de 1,0 m da parte central das entrelinhas do

cafeeiro. No tratamento com consórcio braquiária-estilosantes, os dois sulcos centrais receberam as sementes de braquiária e os dois sulcos mais próximos das linhas de plantio do cafeeiro receberam as sementes de estilosantes. Nos tratamentos com adubação química, o fosfato natural foi aplicado no fundo dos sulcos de semeadura.

A área útil de avaliação de cada subparcela continha as cinco linhas de plantio centrais do cafeeiro, com oito plantas cada uma, totalizando 40 plantas efetivas por subparcela.

Devido à baixa precipitação no período que sucedeu o plantio do café no mês de fevereiro (Figura 1), as mudas de cafeeiro foram irrigadas com dois a três litros de água a cada dois dias durante a primeira semana e a cada quatro dias nas duas semanas seguintes para garantir o bom estabelecimento. O controle de invasoras foi realizado por meio de capinas manuais e herbicidas pré-emergentes, e o controle de pragas e doenças, por meio da aplicação de fungicidas e inseticidas registrados para a cultura, quando necessário.

O manejo das plantas intercalares foi realizado com roçadas toda vez que a braquiária atingia 0,6 m de altura, totalizando cinco cortes, efetuados aos 60, 126, 246, 309 e 364 dias após semeadura das plantas de cobertura. A massa das plantas intercalares após o corte era depositada sobre o solo nas linhas de plantio do cafeeiro numa faixa de 0,5 m de cada lado para servir como cobertura morta.

Dados de pluviosidade e temperaturas máxima e mínima (Figura 1) foram obtidos em estação climatológica automatizada instalada no local do experimento, com armazenamento dos dados a cada 24 horas.

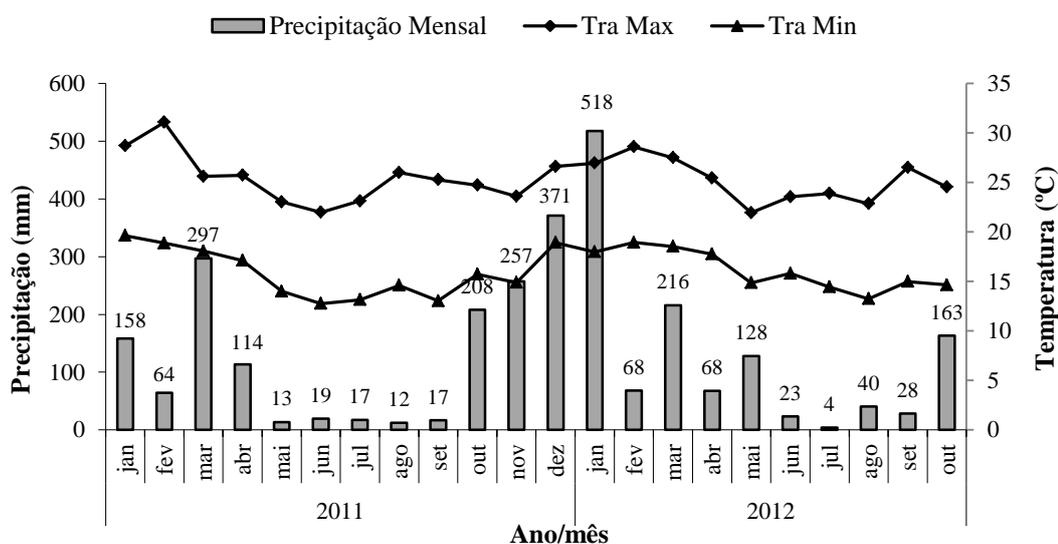


Figura 1: Precipitações mensais e médias mensais das temperaturas máxima (Tra Max) e mínima (Tra Min) no período de duração do experimento.

2.2. Amostragens e análises de solo

Realizaram-se amostragens de solo para avaliação de atributos orgânicos, químicos, físicos e microbiológicos nas seguintes condições: i) pré-mineração, em uma área coberta com cafeeiro de 10 anos de idade e em uma área adjacente coberta com mata nativa (Mata Atlântica em estágio de regeneração secundário), que serviram como referência do estado do solo na sua condição original sob cultivo agrícola típico na região (cafeeiro) e sob vegetação natural (mata), antes que se iniciasse o processo de lavra; ii) seis meses pós-reconfiguração da área minerada (antes da aplicação dos tratamentos), que serviu para avaliar o impacto da mineração e como referência inicial para o processo de recuperação; iii) 19 meses após a aplicação dos tratamentos de recuperação com cafeeiro na área minerada.

Nas áreas antes da mineração (mata e cafeeiro) e após a reconfiguração, as amostras de solo foram coletadas em três blocos amostrais de 25 x 50 m em cada área, distribuídos ao longo do declive do terreno e no experimento após 19 meses da aplicação dos tratamentos, as amostras foram coletadas nas subparcelas.

Para as análises de atributos químicos e orgânicos foram coletadas amostras de solo com trado tipo sonda, na profundidade de 0-20 cm, em dez pontos por bloco amostral nas áreas de referência (mata e cafeeiro pré-mineração e área minerada pós-reconfiguração) e em sete pontos nas entrelinhas do cafeeiro dentro da área útil de cada subparcela após 19 meses de implantação do experimento de recuperação da área minerada. As amostras simples de solo coletadas foram reunidas em uma única amostra composta por bloco ou por subparcela e foram secadas ao ar, destorroadas, passadas em peneira com malha de 2 mm, homogeneizadas e subamostras foram retiradas para caracterização química e física conforme EMBRAPA (1997).

Foram determinados o pH em água (1:2,5) por potenciometria, a acidez trocável (Al^{3+}) extraída com KCl 1 mol/L e quantificada por titulometria com NaOH 0,01 mol/L, padronizado com biftalato de potássio; a acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) extraída com acetato de cálcio 0,5 mol/L em pH 7 e titulada com NaOH 0,05 mol/L; o P e o K^+ foram extraídos com Mehlich-1 e determinados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente. Cálcio e Mg^{2+} foram extraídos com KCl 1 mol/L e determinados por espectrofotometria de absorção atômica; o Fe, Zn e Mn foram extraídos com Mehlich-1 e determinados por espectrofotometria de absorção atômica. O P-remanescente (P-rem) foi determinado com solução com concentração

inicial de 60 mg/L e tempo de agitação de 16 h. O nitrogênio total do solo (NT) foi determinado por destilação Kjeldahl após digestão sulfúrica (BATAGLIA et al., 1983). O carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método de oxidação via úmida, com aquecimento externo (YEOMANS e BREMNER, 1988), utilizando subamostras trituradas e passadas em peneira de malha de 0,149 mm. O carbono orgânico lábil (COL) foi quantificado por meio de oxidação com KMnO_4 (33 mmol/L), como proposto por Blair et al. (1995) e modificado por Shang e Tiessen (1997).

Com os resultados obtidos nas análises do complexo sortivo, foram calculados a soma de bases (SB), a capacidade de troca de cátions em pH 7 ($\text{CTC} = \text{SB} + \text{H+Al}$), a capacidade de trocas de cátions efetiva ($t = \text{SB} + \text{Al}^{3+}$), a saturação por alumínio ($m = 100 \times \text{Al}^{3+}/t$) e a saturação por base ($V = 100 \times \text{SB}/\text{CTC}$).

Para as análises físicas foram coletadas amostras indeformadas de solo com anéis volumétricos (5 cm x 5 cm) no centro da camada de 0-20 cm, sendo quatro amostras por bloco nas áreas pré-mineração e pós-reconfiguração e uma amostra por subparcela nas entrelinhas do cafeeiro após 19 meses da instalação do experimento de recuperação. Com essas amostras foram determinadas a densidade do solo (D_s) pelo método do anel volumétrico e a microporosidade (Micro) pelo método da mesa de tensão. A porosidade total (PT) foi estimada pela fórmula proposta por EMBRAPA (1997). A macroporosidade (Macro) foi estimada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade. Nas amostras deformadas foi determinada a densidade de partículas pelo método do balão volumétrico.

Para as análises microbiológicas, amostras frescas de solo foram coletadas na camada de 0-20 cm, aproveitando-se as trincheiras abertas para a coleta das amostras para análises físicas, e foram transportadas do campo sob refrigeração. Nessas amostras foi avaliada a atividade respiratória basal da biomassa microbiana (C-CO_2) pela quantificação do CO_2 liberado durante incubação do solo em sistema fechado durante 30 dias, onde o CO_2 capturado em solução de NaOH 0,05 mol/L foi titulado com HCl 0,01 mol/L (ALEF, 1995) após 48, 168, 360 e 720 horas do início da incubação. Amostras na camada de 0-10 cm foram coletadas, transportadas sob refrigeração e armazenadas a -80°C para análise das enzimas β -glicosidade (β -Glic) e fosfomosterases ácida (FosAci) e alcalina (FosAlc) pela determinação por espectrofotometria do *p*-nitrofenol formado após a incubação de subamostras de solo

com substratos específicos para cada enzima, utilizando os métodos descritos por Eivazi e Tabatabai (1977; 1988).

2.3. Análises estatísticas e elaboração do índice de qualidade do solo (IQS)

Os dados obtidos foram submetidos a análises estatísticas uni e multivariadas visando selecionar um conjunto de indicadores (orgânicos, químicos, físicos e microbiológicos) para comporem um IQS, adaptando-se as metodologias utilizadas por Brejda et al. (2000) e Andrade et al. (2005). Todas as análises estatísticas foram processadas utilizando os softwares GENES (Cruz, 2006a) e SISVAR (Ferreira, 2011).

Inicialmente, os 27 atributos obtidos (variáveis originais ou derivadas dos cálculos do complexo sortivo) das análises das áreas referência e de 19 meses pós-tratamentos foram submetidos à ANOVA, eliminando-se aqueles atributos que não apresentaram diferenças estatísticas ($p > 0,1$) entre os tratamentos, considerando-os como insensíveis às alterações provocados pelo uso do solo ou aplicação dos tratamentos. Quando necessário, os dados foram transformados para \sqrt{Y} , $\ln Y$ ou $1/Y$, adicionando as constantes 0,5 ou 1,0, se necessárias, para que os desvios seguissem a distribuição normal.

A análise de fatores foi usada para agrupar os atributos do solo baseado em sua estrutura de correlação, utilizando a análise de componentes principais como método de extração dos fatores. A análise de fatores foi realizada com as variáveis padronizadas pela média e o desvio padrão para eliminar o efeito das diferentes unidades de medida sobre a determinação das cargas fatoriais. Os atributos do solo incluídos na análise foram o COT, COL, NT, P, Mn, Fe, Zn, pH, Al^{3+} , H+Al, P-rem, SB, Ds, micro, macro, PT, FosAci, FosAlc, β -Glic e C-CO₂. Para evitar redundância no uso de variáveis na análise de fatores, as variáveis derivadas CTC, t, V e m foram excluídas por serem combinações de outras variáveis já inclusas nas análises (SB, H+Al e Al^{3+}). Da mesma forma, optou-se por utilizar a SB, por esta representar o conjunto de cátions básicos trocáveis do solo (K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}).

Foram selecionados para interpretação apenas os fatores que apresentaram autovalores $> 1,0$, por explicarem mais da variação total nos dados do que um único atributo. Os fatores retidos foram submetidos à rotação varimax para maximizar a

relação entre atributos interdependentes, o que facilita a interpretação (Mingoti, 2007). Os fatores retidos foram interpretados e nomeados de acordo com os atributos agrupados em cada fator. Estes foram considerados como “novas variáveis” (Cruz, 2006b; Mingoti, 2007) e as médias dos escores foram utilizadas para comparar os tratamentos de recuperação com cafeeiro da área minerada pelo teste de Scott-Knott a 10 % de probabilidade e, esses tratamentos, com as referências pré e pós-mineração pelo teste de Dunnett a 10 %.

Nos fatores retidos, os atributos que apresentaram cargas fatoriais rotacionadas $\geq 0,84$ (em módulo) foram inicialmente selecionados como candidatos a indicadores da qualidade do solo, e foram agrupados como sendo orgânicos, químicos, físicos ou microbiológicos. Quando mais de um atributo no mesmo grupo de indicadores apresentou alta carga fatorial ($\geq 0,84$), foram utilizados alguns critérios para seleção de um único atributo representativo do grupo, de modo que, no final, fossem selecionados quatro atributos, representativos da qualidade orgânica, química, física e microbiológica do solo, para o cálculo do IQS. Os critérios utilizados foram a maior correlação do atributo com o fator (carga fatorial) e com os demais atributos do grupo no fator (correlação de Pearson), a maior comunalidade (proporção da variação do atributo explicada pelos fatores retidos), a sensibilidade do atributo às alterações no solo, baseando-se na literatura, e sua maior praticidade de determinação. Com isso, tentou-se evitar o uso de atributos considerados redundantes no IQS (Masto et al., 2008).

Para atribuir os pesos (W_i) a cada indicador da qualidade do solo utilizado no IQS, os quatro atributos selecionados foram novamente submetidos à análise de fatores e os autovalores $> 1,0$ e as respectivas cargas fatoriais rotacionadas dos atributos foram utilizados no cálculo dos pesos relativos dos atributos no IQS, conforme a fórmula:

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n (R_{ij}^2 F_j)}{\sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^n (R_{ij}^2 F_j) \right]}$$

em que:

W_i = peso relativo do atributo i no IQS;

R_{ij} = carga fatorial rotacionada do atributo i no fator j ;

F_j = autovalor do fator j ;

i = índices dos atributos selecionados;
j = índices dos fatores retidos com autovalor > 1,0.

Após a seleção dos indicadores, cada um deles teve seus valores normalizados por meio de uma padronização relativa para serem incluídos no IQS, sendo transformados em escores de indicadores, que variam de 0 a 1 (Liebig et al., 2001; Bhardwaj et al., 2011). Os valores de cada indicador foram ranqueados em ordem ascendente ou descendente dependendo se o maior valor era considerado prejudicial ou benéfico, respectivamente, às funções do solo. Para indicadores do tipo “mais é melhor”, cada observação foi dividida pelo maior valor observado, de modo que o valor mais alto recebeu o escore 1,0. Para indicadores do tipo “menos é melhor”, o menor valor observado (no numerador) foi dividido por cada observação (no denominador), de modo que o valor mais baixo recebeu o escore 1,0. Para aqueles indicadores onde nem os valores mais altos, nem os valores mais baixos são os melhores (“ótimo”), as observações foram pontuadas como “mais é melhor” até um valor limite e então pontuadas como “menos é melhor” acima deste valor.

O IQS foi calculado pelo somatório do escore de cada indicador (S_i) ponderado pelo peso deste indicador na avaliação da qualidade do solo (W_i), conforme a fórmula:

$$IQS = \sum_{i=1}^n S_i W_i$$

em que:

IQS = índice de qualidade do solo, um número entre 0 e 1;

S_i = escore do i-ésimo indicador, um número entre 0 e 1;

W_i = peso do i-ésimo indicador, um número entre 0 e 1;

i = índices dos atributos.

Os dados dos IQS's gerados para os tratamentos de recuperação da área minerada foram submetidos à ANOVA e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott a 10 % de probabilidade e, esses, comparados com as referências pelo teste de Dunnett a 10 %.

A relação linear entre os IQS's e o crescimento das plantas de cobertura intercalares (PC) e do cafeeiro foi avaliada ajustando-se regressões lineares simples.

O IQS foi correlacionado com a produção de matéria seca (MS) acumulada em cinco cortes (aos 60, 126, 246, 309 e 364 dias após plantio das PC) de cada um dos tipos de PC durante o primeiro ano de crescimento. Para o cafeeiro, o IQS foi correlacionado com a altura, o diâmetro do caule ao nível do solo, o número total de ramos plagiotrópicos por planta e número de nós por ramo na altura média, medidos nos quatro quadrantes da planta, após 21 meses de crescimento. Os coeficientes de correlação foram testados pelo teste t a 10 % de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve diferença significativa ($p < 0,1$) entre os tratamentos em todos os atributos do solo estudados (Tabela 3). Desse modo, nenhuma das variáveis foi eliminada por esse critério inicial de seleção de atributos.

Quando não há correlação entre os atributos do solo, a identificação de padrões de agrupamento dos atributos nos fatores não é possível (Brejda et al., 2000; Mingoti, 2007). Todavia, correlações significativas ($p < 0,05$) foram observadas em 141 dos 253 pares de atributos do solo submetidos à análise de correlação simples (Tabela 4). A alta frequência de correlações indica que os atributos do solo podem ser agrupados em fatores baseados nas suas estruturas de correlação.

De modo geral, a maioria dos atributos se correlacionou positivamente, com exceção da Ds e a Micro, que apresentaram correlações negativas com a maioria dos atributos (Tabela 4). Os atributos orgânicos COT, COL e NT apresentaram forte correlação positiva ($> 0,90^{**}$) com a atividade da enzima fosfomocetase ácida e com os atributos físicos macro e PT, e negativas com a Ds e micro, demonstrando o importante papel da matéria orgânica do solo (MOS) para a atividade microbiológica, a agregação e formação de poros de maior tamanho no solo, com consequente redução da Ds (John et al., 2005). No entanto, não foram observadas correlações significativas ($p > 0,05$) dos atributos orgânicos com a disponibilidade dos nutrientes P, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺, provavelmente devido à baixa disponibilidade destes nutrientes na área de mata nativa que, por outro lado, apresentou os maiores teores de COT, COL e NT (Tabela 3).

Os três primeiros fatores tiveram autovalores maiores do que 1 (Tabela 5) e foram retidos para interpretação. As comunalidades estimam a proporção da variância em cada atributo do solo que é explicada pelos fatores (Brejda et al., 2000).

Tabela 3: Médias dos atributos do solo, na camada de 0-20 cm, em áreas pré-mineração com mata nativa e cafeeiro, seis meses após reconfiguração de área minerada de bauxita e após 19 meses de recuperação com a cultura do cafeeiro sob diferentes adubações e plantas de cobertura intercalares.

Atributo	Unidade	Mata	PrÉM	PósM	Sem adubação				Cama de aviário				Química				Cama de aviário + Química				ANOVA P > F
					B	B+E	E	SP	B	B+E	E	SP	B	B+E	E	SP	B	B+E	E	SP	
COT	dag/kg	5,77	3,61	1,51	1,43	1,46	1,28	1,28	1,44	1,58	1,80	1,11	1,34	1,59	1,49	1,27	1,57	1,61	1,50	1,70	0,01
COL	g/kg	3,10	2,84	0,59	0,77	0,99	0,84	0,83	1,24	1,21	1,34	0,90	0,96	1,14	1,01	0,87	1,40	1,56	1,27	1,41	0,01
NT	dag/kg	0,37	0,25	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05	0,08	0,08	0,10	0,06	0,06	0,06	0,05	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,01
P	mg/dm ³	2,05	7,87	1,05	0,61	0,92	0,73	0,67	24,6	18,6	19,8	28,0	25,7	13,9	12,2	5,45	43,3	100,6	55,7	43,6	0,01
K ⁺	cmol _c /dm ³	0,14	0,19	0,07	0,20	0,40	0,22	0,12	1,23	1,31	0,89	0,45	0,38	0,53	0,41	0,30	1,18	1,62	0,91	0,61	0,01
Ca ²⁺	cmol _c /dm ³	0,21	1,92	0,37	0,29	0,53	0,37	0,49	1,62	1,83	1,77	1,63	2,15	2,12	3,24	2,23	3,21	4,39	3,48	3,70	0,01
Mg ²⁺	cmol _c /dm ³	0,02	0,54	0,13	0,06	0,32	0,09	0,19	0,44	0,49	0,54	0,57	0,28	0,35	0,45	0,27	0,49	0,69	0,66	0,70	0,01
Mn	mg/dm ³	8,04	14,3	5,04	2,85	3,32	2,72	2,33	7,51	7,17	8,37	6,63	1,68	2,48	3,23	2,43	7,92	16,2	10,3	11,0	0,01
Fe	mg/dm ³	230,6	96,5	174,9	91,8	105,1	84,5	73,2	50,2	59,0	76,9	28,6	40,6	43,2	50,9	47,5	53,8	55,9	42,7	53,3	0,01
Zn	mg/dm ³	10,7	10,9	1,25	0,25	0,29	0,24	0,21	4,71	4,13	4,80	5,85	0,28	0,32	0,34	0,40	3,94	10,0	5,73	5,88	0,01
pH		4,62	5,64	5,09	5,09	5,25	5,05	4,98	5,76	5,81	5,41	5,72	6,02	5,80	6,19	5,98	6,25	6,71	6,31	6,03	0,01
Al ³⁺	cmol _c /dm ³	1,56	0,10	0,14	0,12	0,08	0,05	0,05	0,01	0,03	0,04	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,01
H + Al	cmol _c /dm ³	14,7	7,22	3,91	5,29	5,59	4,74	4,87	4,38	4,38	5,86	3,25	3,53	4,36	4,16	3,54	3,51	2,50	3,29	4,25	0,01
P-rem	mg/dm ³	41,1	50,2	55,5	95,7	90,4	74,2	73,6	95,6	88,9	91,0	72,4	83,7	91,0	77,9	94,4	109,4	108,6	99,3	120,4	0,01
SB	cmol _c /dm ³	0,37	2,64	0,57	0,55	1,24	0,68	0,79	3,29	3,63	3,20	2,65	2,81	3,00	4,09	2,79	4,88	6,69	5,05	5,01	0,01
CTC	cmol _c /dm ³	15,0	9,86	4,49	5,84	6,83	5,42	5,66	7,66	8,01	9,07	5,90	6,34	7,36	8,25	6,34	8,38	9,19	8,34	9,27	0,01
t	cmol _c /dm ³	1,93	2,74	0,71	0,67	1,32	0,73	0,85	3,29	3,66	3,25	2,66	2,81	3,01	4,09	2,80	4,91	6,69	5,06	5,02	0,01
V	%	2,50	26,1	13,0	9,39	18,1	11,5	11,7	43,0	46,3	35,1	44,9	44,9	41,0	50,3	44,4	58,2	73,0	61,0	53,9	0,01
m	%	80,1	4,07	19,3	17,8	5,90	5,57	14,4	0,20	0,81	1,47	0,34	0,00	0,19	0,00	0,11	0,66	0,00	0,06	0,13	0,01
Ds	kg/dm ³	0,57	0,69	1,22	1,34	1,39	1,30	1,36	1,25	1,29	1,22	1,36	1,28	1,25	1,22	1,31	1,22	1,26	1,33	1,21	0,01
Micro	dm ³ /dm ³	0,25	0,28	0,24	0,34	0,37	0,33	0,33	0,34	0,35	0,35	0,35	0,33	0,34	0,37	0,32	0,38	0,29	0,36	0,34	0,01
Macro	dm ³ /dm ³	0,52	0,45	0,33	0,19	0,14	0,21	0,19	0,22	0,19	0,22	0,19	0,22	0,23	0,21	0,22	0,19	0,25	0,17	0,23	0,01
PT	dm ³ /dm ³	0,76	0,73	0,57	0,53	0,51	0,54	0,52	0,56	0,54	0,56	0,54	0,55	0,57	0,58	0,54	0,57	0,55	0,52	0,57	0,01
FosAci#	µg p-nitrofenol/h/g solo	379,1	223,3	79,1	91,2	86,7	74,6	66,3	129,7	104,7	132,4	69,2	91,5	62,6	61,0	42,6	107,9	89,6	101,0	88,7	0,01
FosAlc#	µg p-nitrofenol/h/g solo	55,9	38,2	0,00	11,6	19,6	17,2	5,24	43,4	31,3	32,1	31,5	25,6	20,3	19,8	14,3	37,3	40,1	22,7	24,6	0,10
β-Glic#	µg p-nitrofenol/h/g solo	78,4	64,9	21,8	2,00	17,6	16,1	26,8	35,1	38,4	44,7	50,7	4,38	10,2	18,4	4,02	28,0	31,5	30,1	30,8	0,01
C-CO ₂	µg de C-CO ₂ /h/g solo	0,18	0,18	0,23	0,16	0,20	0,14	0,13	0,27	0,24	0,19	0,17	0,30	0,27	0,25	0,25	0,68	0,27	0,45	0,36	0,01

PrÉM = cafeeiro pré-mineração
PósM = seis meses pós-reconfiguração.
B = braquiária.
E = estilosantes.
B+E = consórcio braquiária + estilosantes.
SP = sem planta de cobertura.

COT = carbono orgânico total.
NT = nitrogênio total.
COL = carbono orgânico lábil.
P-rem = fósforo remanescente.
SB = soma de bases.
CTC = capacidade de troca de cátions a pH.

t = capacidade de troca de cátions efetiva.
V = saturação por bases.
m = saturação por alumínio.
Ds = densidade do solo.
Macro = macroporosidade.
Micro = microporosidade.

PT = porosidade total.
FosAci = atividade da enzima fosfomonoesterase ácida.
FosAlc = atividade da enzima fosfomonoesterase alcalina.
β-Glic = atividade da enzima β-glicosidade.
C-CO₂ = respiração basal do solo.
Amostras coletadas na camada de 0-10 cm.

Tabela 4: Coeficientes de correlação de Pearson entre atributos do solo, avaliados na camada de 0-20 cm, em áreas pré-mineração cobertas com mata nativa e cafeeiro, seis meses após reconfiguração de área minerada de bauxita e após 19 meses de recuperação com a cultura do cafeeiro sob diferentes adubações e plantas de cobertura intercalares (n=19).

Atributos do solo	COT	COL	NT	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn	pH	Al ³⁺	H + Al	P-rem	SB	Ds	Micro	Macro	PT	FosAci	FosAlc	β-Glc	
COL	0,92 **																						
NT	0,99 **	0,92 **																					
P	-0,17	0,09	-0,18																				
K ⁺	-0,23	0,02	-0,25	0,77 **																			
Ca ²⁺	-0,22	0,07	-0,24	0,83 **	0,64 **																		
Mg ²⁺	-0,23	0,12	-0,20	0,74 **	0,68 **	0,84 **																	
Mn	0,35	0,61 **	0,39	0,69 **	0,54 *	0,54 *	0,69 **																
Fe	0,73 **	0,46 *	0,74 **	-0,42	-0,45	-0,60 **	-0,60 **	0,02															
Zn	0,66 **	0,83 **	0,69 **	0,48 *	0,35	0,31	0,46 *	0,90 **	0,25														
pH	-0,39	-0,10	-0,40	0,79 **	0,67 **	0,95 **	0,79 **	0,41	-0,72 **	0,17													
Al ³⁺	0,89 **	0,68 **	0,86 **	-0,24	-0,29	-0,39	-0,46 *	0,08	0,81 **	0,44	-0,54 *												
H + Al	0,93 **	0,75 **	0,91 **	-0,42	-0,38	-0,48 *	-0,45	0,08	0,79 **	0,42	-0,65 **	0,93 **											
P-rem	-0,60 **	-0,40	-0,65 **	0,59 **	0,64 **	0,63 **	0,54 *	0,13	-0,68 **	-0,17	0,64 **	-0,57 *	-0,62 **										
SB	-0,24	0,07	-0,26	0,87 **	0,79 **	0,97 **	0,89 **	0,61 **	-0,62 **	0,37	0,94 **	-0,40	-0,49 *	0,67 **									
Ds	-0,95 **	-0,93 **	-0,96 **	0,16	0,23	0,12	0,13	-0,42	-0,64 **	-0,68 **	0,28	-0,75 **	-0,82 **	0,62 **	0,16								
Micro	-0,61 **	-0,47 **	-0,65 **	0,11	0,31	0,30	0,35	-0,29	-0,73 **	-0,45	0,38	-0,57 *	-0,50 *	0,63 **	0,33	0,64 **							
Macro	0,90 **	0,82 **	0,92 **	-0,18	-0,32	-0,22	-0,25	0,37	0,74 **	0,63 **	-0,36	0,74 **	0,76 **	-0,71 **	-0,27	-0,95 **	-0,84 **						
PT	0,94 **	0,91 **	0,95 **	-0,20	-0,28	-0,14	-0,16	0,37	0,63 **	0,64 **	-0,29	0,74 **	0,81 **	-0,65 **	-0,19	-0,99 **	-0,63 **	0,95 **					
FosAci#	0,97 **	0,90 **	0,97 **	-0,13	-0,12	-0,25	-0,19	0,39	0,70 **	0,69 **	-0,40	0,87 **	0,91 **	-0,55 *	-0,23	-0,91 **	-0,55 *	0,84 **	0,89 **				
FosAlc#	0,61 **	0,77 **	0,60 **	0,38	0,49 *	0,27	0,34	0,60 **	0,11	0,79 **	0,19	0,48 *	0,47 *	-0,05	0,35	-0,60 **	-0,13	0,45	0,58 **	0,70 **			
β-Glc#	0,75 **	0,81 **	0,79 **	0,08	0,09	-0,05	0,23	0,63 **	0,43	0,85 **	-0,21	0,59 **	0,64 **	-0,48 *	0,02	-0,74 **	-0,42	0,67 **	0,72 **	0,79 **	0,71 **		
C-CO ₂	-0,15	0,01	-0,18	0,52 *	0,51 *	0,63 **	0,44	0,25	-0,31	0,09	0,62 **	-0,19	-0,32	0,55 *	0,63 **	0,11	0,36	-0,24	-0,12	-0,11	0,20	-0,11	

* e ** significativo a 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente.

COT = carbono orgânico total.

COL = carbono orgânico lábil.

NT = nitrogênio total.

P-rem = fósforo remanescente.

SB = soma de bases (K⁺ + Ca²⁺ + Mg²⁺).

Ds = densidade do solo.

Micro = microporosidade.

Macro = macroporosidade.

PT = porosidade total.

FosAci = atividade da enzima fosfomonoesterase ácida.

FosAlc = atividade da enzima fosfomonoesterase alcalina.

β-Glc = atividade da enzima β-glicosidade.

C-CO₂ = respiração basal do solo.

Amostras coletadas na camada de 0-10 cm.

Tabela 5: Cargas fatoriais rotacionadas e comunalidades de três fatores calculados a partir de atributos do solo, avaliados na camada de 0-20 cm, em áreas pré-mineração cobertas com mata nativa e cafeeiro, seis meses após reconfiguração de área minerada de bauxita e após 19 meses de recuperação com a cultura do cafeeiro sob diferentes adubações e tipos de plantas de cobertura intercalares.

Grupo de indicadores	Atributo do solo	Fator 1 (DMOS)	Fator 2 (DN)	Fator 3 (Micro)	Comunalidades
Orgânicos	Carbono Orgânico Total (COT)	-0,96	-0,12	-0,19	0,98
	Carbono Orgânico Lábil (COL)	-0,94	0,21	-0,12	0,94
	Nitrogênio Total (NT)	-0,95	-0,11	-0,27	0,99
Químicos	P	0,06	0,92	0,09	0,86
	Mn	-0,43	0,81	-0,26	0,91
	Fe	-0,61	-0,48	-0,42	0,77
	Zn	-0,72	0,59	-0,27	0,94
	pH	0,27	0,84	0,28	0,86
	Al ³⁺	-0,85	-0,34	-0,10	0,84
	H+Al	-0,88	-0,42	-0,10	0,96
	P-remanescente (P-rem)	0,47	0,52	0,55	0,79
	Soma de Bases (SB)	0,09	0,92	0,29	0,95
Físicos	Densidade do solo (Ds)	0,92	0,02	0,28	0,92
	Microporosidade (Micro)	0,45	0,07	0,81	0,86
	Macroporosidade (Macro)	-0,81	-0,07	-0,52	0,93
	Porosidade Total (PT)	-0,90	-0,06	-0,27	0,90
Microbiológicos	Atividade da Fosfomonoesterase Ácida (FosAci)	-0,97	-0,09	-0,12	0,97
	Atividade da Fosfomonoesterase Alcalina (FosAlc)	-0,77	0,43	0,21	0,82
	Atividade da β -Glicosidade (β -Glic)	-0,80	0,21	-0,24	0,75
	Respiração basal do solo (C-CO ₂)	-0,02	0,50	0,59	0,60
Autovalores		11,49	4,95	1,12	
Porcentagem da variância explicada		57,43	24,73	5,58	
Porcentagem acumulada		57,43	82,16	87,74	

DMOS = depleção da matéria orgânica do solo; DN = disponibilidade de nutrientes; Micro = microporosidade. Em negrito, os atributos orgânicos, químicos, físicos e microbiológicos selecionados como indicadores da qualidade do solo.

Os três fatores explicaram mais de 90 % da variação nos teores de COT, COL, NT, Mn, Zn, H+Al, bases trocáveis, Ds, Macro e PT, assim como da FosAci. Os três fatores também explicaram mais de 75 % da variação dos demais atributos, com exceção da C-CO₂, que teve apenas 60 % da variação explicada, consequência da baixa correlação com os demais atributos (Tabela 4).

A ordem em que cada fator foi interpretado foi determinada pela magnitude dos seus autovalores. O primeiro fator foi chamado de “fator depleção da matéria orgânica do solo” (DMOS), pois apresentou altas cargas fatoriais negativas (< -0,90) com atributos diretamente ligados à MOS (COT, COL, NT) e com atributos que são influenciados por ela (PT e atividade da FosAci), assim como alta carga fatorial positiva com a Ds (Tabela 5). O fator DMOS também teve cargas fatoriais negativas

elevadas com os teores de Zn, Al^{3+} e H+Al, com a macroporosidade e com a atividade das enzimas fosfomocetase alcalina e β -glicosidade.

O segundo fator foi chamado de “fator disponibilidade de nutrientes” por apresentar elevadas cargas fatoriais positivas ($> 0,90$) com a SB e com o teor de P. Este fator também apresentou carga fatorial positiva com o pH, que tem relação direta com a disponibilidade de nutrientes (Bohn et al., 2001). O terceiro fator foi chamado de “fator microporosidade” por apresentar a maior carga fatorial positiva (0,81) com a microporosidade.

Os três fatores juntos explicaram 87,7 % da variação dos dados, sendo que 82,2 % foi explicada pelos dois primeiros fatores, o que permitiu uma boa representação da dispersão gráfica dos escores dos tratamentos em dois eixos cartesianos (Figura 2). A dispersão gráfica dos escores permite a observação de tendências dos efeitos dos tratamentos de forma a facilitar a interpretação dos resultados da análise de fatores (Cruz, 2006b). O tratamento com braquiária adubada com C+Q foi o que apresentou a tendência de maior aproximação da área com cafeeiro pré-mineração, em relação ao fator DMOS, e os tratamentos sem planta com adubação Q e T foram os que mais se mantiveram próximos da condição inicial da área em recuperação (pós-reconfiguração). O tratamento com consórcio B+E adubado com C+Q foi o que apresentou os maiores valores no fator disponibilidade de nutrientes, consequência da maior SB, teor de P e pH mais alto (Tabela 3).

A análise das médias dos escores dos três fatores retidos permitiu observar diferenças significativas ($p < 0,1$) entre os tratamentos de recuperação da área minerada e também em relação às áreas de referência pré e pós-mineração (Tabela 6). Os menores valores do fator depleção da MOS (mais negativos) foram observados na área de mata nativa (-6,36) e cafeeiro pré-mineração (-4,36) e o maior valor na área pós-reconfiguração, demonstrando que a mineração causou grande impacto negativo sobre a MOS. Interações significativas ($p < 0,05$) entre as adubações e os tipos de plantas de cobertura foram observadas nos três fatores. Os tratamentos com a braquiária adubada com C e C+Q, o estilósantes adubado com C e as parcelas sem planta com adubação C+Q foram os únicos tratamentos que contribuíram para melhorar a MOS, reduzindo o fator DMOS em relação à referência pós-reconfiguração (Tabela 6). No entanto, nenhum dos tratamentos se aproximou das referências pré-mineração.

De modo geral, as adubações C e C+Q contribuíram para reduzir a depleção da MOS em relação às adubações Q e T, exceto quando utilizou-se o consórcio B+E como planta de cobertura que não diferiu das demais adubações. As plantas de cobertura reduziram a DMOS quando adubadas, principalmente a braquiária, o que não ocorreu nas parcelas sem adubação, consequência do baixo crescimento das plantas sem fertilização.

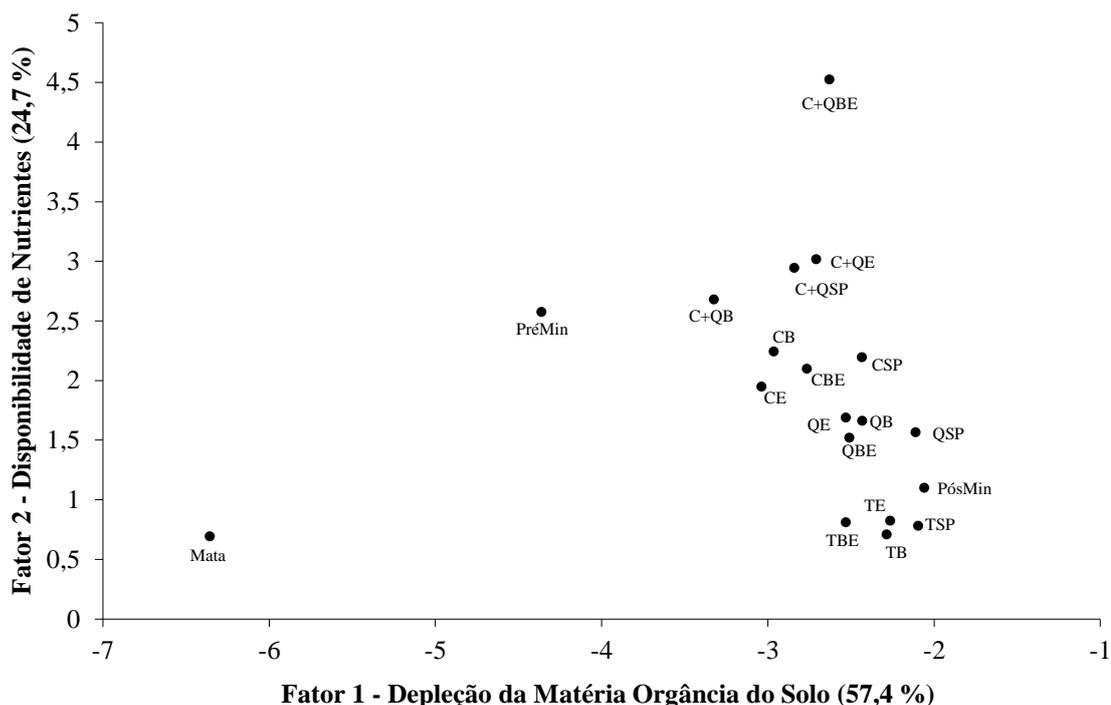


Figura 2: Dispersão gráfica dos escores em relação aos eixos representativos dos Fatores 1 (depleção da matéria orgânica do solo) e 2 (disponibilidade de nutrientes) relativos a 20 atributos do solo avaliados na camada de 0-20 cm em áreas pré-mineração cobertas com mata e cafeeiro (PreMin), seis meses pós-reconfiguração (PosMin) e após 19 meses de recuperação com cultura do cafeeiro em área minerada de bauxita utilizando diferentes adubações (C – cama de aviário; Q – adubação química; C+Q – orgânica e química combinadas; T – sem adubação) e tipos de plantas de cobertura intercalares (B – braquiária; E - estilosantes; SP – sem planta de cobertura intercalar).

As adubações C e C+Q aumentaram o fator disponibilidade de nutrientes em relação às áreas pós-reconfiguração e de mata e foram equivalentes à área com cafeeiro pré-mineração (Tabela 6). As plantas de cobertura não apresentaram efeito sobre a disponibilidade de nutrientes, exceto o consórcio B+E adubado com C+Q que se mostrou superior. Em geral, o fator disponibilidade de nutrientes decresceu no

sentido C+Q > C > Q > T, refletindo as diferentes quantidades de nutrientes adicionados (Tabela 1). A disponibilidade de nutrientes na adubação T foi tão baixa quanto na área de mata. Porém, essas quantidades de nutrientes não são suficientes para suportar alto crescimento e produção da cultura do cafeeiro (CFSEMG, 1999), ao contrário do que é observado nas áreas de Mata Atlântica da região, devido à não exportação e ciclagem de nutrientes que garantem a manutenção deste ecossistema (Correia e Andrade, 2008).

Tabela 6: Média dos escores dos fatores de qualidade do solo gerados a partir de 20 atributos avaliados na camada de 0-20 cm em áreas pré-mineração cobertas com mata e cafeeiro (PreMin), seis meses pós-reconfiguração (PosMin) e após 19 meses de recuperação com cultura do cafeeiro em área minerada de bauxita utilizando diferentes adubações e plantas de cobertura intercalares

Fator	Adubação	Plantas de Cobertura Intercalares					Referências			
		B	B+E	E	SP	Média	CV (%)	PósMin	PréMin	Mata
Fator 1 (DMOS)	T	-2,29 ^{Ba*}	-2,53 ^{Aa*}	-2,26 ^{Ba*}	-2,09 ^{Ba*}	-2,29	19,08			
	C	-2,96 ^{Aa}	-2,77 ^{Aa*}	-3,04 ^{Aa}	-2,43 ^{Bb*}	-2,80				
	Q	-2,43 ^{Ba*}	-2,51 ^{Aa*}	-2,53 ^{Ba*}	-2,11 ^{Bb*}	-2,40				
	C+Q	-3,32 ^{Aa}	-2,63 ^{Ab*}	-2,71 ^{Ab*}	-2,84 ^{Ab}	-2,88				
	Média	-2,75	-2,61	-2,63	-2,37					
	CV (%)			8,94				11,6		
Fator 2 (DN)	T	0,71 ^{Ca*£}	0,81 ^{Da*£}	0,82 ^{Ca*£}	0,78 ^{Da*£}	0,78	18,31			
	C	2,24 ^{Aa†}	2,10 ^{Ba†}	1,95 ^{Ba†}	2,19 ^{Ba†}	2,12				
	Q	1,66 ^{Ba*}	1,52 ^{Ca*}	1,69 ^{Ba*}	1,56 ^{Ca*}	1,61				
	C+Q	2,68 ^{Ab†}	4,52 ^{Aa}	3,02 ^{Ab†}	2,94 ^{Ab†}	3,29				
	Média	1,82	2,24	1,87	1,87					
	CV (%)			15,09				20,9		
Fator 3 (Micro)	T	6,45 ^{Bb£}	7,14 ^{Aa£}	5,99 ^{Ab£†}	5,82 ^{Ab£}	6,35	11,86			
	C	6,76 ^{Ba£}	6,60 ^{Aa£}	6,45 ^{Aa£}	5,95 ^{Aa£†}	6,44				
	Q	6,78 ^{Ba£}	6,82 ^{Aa£}	6,92 ^{Aa£}	6,25 ^{Aa£}	6,69				
	C+Q	8,52 ^{Aa}	5,05 ^{Bb*†£}	6,93 ^{Aa£}	6,57 ^{Aa£}	6,77				
	Média	7,13	6,40	6,57	6,15					
	CV (%)			9,63				12,0		

Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro de cada tipo de planta de cobertura (colunas), e de letras minúsculas dentro de cada tipo de adubação (linhas) não diferem a 10 % de probabilidade pelo teste Scott-Knott. Médias dos tratamentos de recuperação da área minerada seguidas dos símbolos *, † e £ não diferem das médias das áreas de referência pós-reconfiguração (PósMin), cafeeiro pré-mineração (Pré-Min) e mata nativa, respectivamente, a 10 % pelo teste de Dunnnett. DMOS = depleção da matéria orgânica do solo; DN = disponibilidade de nutrientes; Micro = microporosidade; C = cama de aviário; Q = adubação química; C+Q = orgânica e química combinadas; T = sem adubação; B = braquiária; B+E = consórcio braquiária e estilosantes; E = estilosantes; SP = sem planta de cobertura.

Quanto ao fator microporosidade (Tabela 6), não ficou claro o efeito dos tratamentos de recuperação, uma vez que todos foram superiores à área pós-reconfiguração e não diferiram da área de mata, exceto a braquiária adubada com C+Q que foi superior, e o consórcio B+E, nesta adubação, que não diferiu da área pós-reconfiguração.

Os atributos que apresentaram cargas fatoriais rotacionadas $\geq 0,84$ (em módulo) com o fator DMOS foram o COT, COL, NT, Al^{3+} , H+Al, Ds, PT e FosfAci e com o fator disponibilidade de nutrientes foram o P, pH e SB (Tabela 5). Isso indica que mais de 70 % da variação destes atributos foi explicada pelo respectivo fator. Dentre estes, os atributos selecionados como indicadores orgânicos, químicos, físicos e microbiológicos da qualidade do solo foram, respectivamente, o COL, a SB, a Ds e a FosfAci. O COL foi selecionado entre os indicadores orgânicos (COT, COL, NT) por apresentar alta carga fatorial negativa com o fator DMOS (-0,94) e por ser apontado como um indicador mais sensível de mudanças na MOS (Blair et al., 1995; Haynes, 2000; Dieckow et al., 2005; Passos et al., 2007). A SB foi selecionada como indicador químico por apresentar alta carga fatorial positiva (0,92) com o fator disponibilidade de nutrientes e por apresentar maior correlação positiva com o P e o pH (Tabela 4). A Ds foi selecionada como indicador físico por apresentar a maior carga fatorial positiva com o fator DMOS (0,92), ter alta correlação negativa com diversos outros atributos (Tabela 4) e por ser de determinação mais fácil do que a PT. A FosfAci foi selecionada como indicador microbiológico por ser o único atributo que apresentou carga fatorial $> 0,84$ (em módulo) com o fator DMOS. A microporosidade apresentou carga fatorial $< 0,84$ com o fator 3 (microporosidade) e também não foi sensível ao efeito dos tratamentos, portanto, este fator não foi incluído no IQS.

A análise de fatores com os indicadores selecionados permitiu calcular os pesos (W_i) de cada indicador, em função dos autovalores e da explicabilidade do indicador pelo fator retido (Tabela 7). Procedimento semelhante foi utilizado por Andrade et al. (2005) para obtenção dos pesos de indicadores da qualidade da água no vale do rio Trussu, no Ceará, porém utilizando a Análise de Componentes Principais (ACP) como método multivariado de análise dos dados.

Tabela 7: Atributos orgânicos, químicos, físicos e microbiológicos, na camada de 0-20 cm, selecionados como indicadores da qualidade do solo, suas cargas fatoriais rotacionadas e pesos no Índice de Qualidade do Solo (IQS) de áreas pré-mineração cobertas com Mata e cultivo de cafeeiro (PreMin), seis meses pós-reconfiguração (PosMin) e após 19 meses de recuperação com cafeeiro utilizando diferentes adubações e plantas de cobertura intercalares

Atributos do solo	Cargas Fatoriais		Peso do atributo no IQS
	Fator 1	Fator 2	
Carbono Orgânico Lábil (COL)	0,98	0,13	0,30
Soma de Bases (SB)	-0,05	1,00	0,11
Densidade do solo (Ds)	-0,97	0,11	0,30
Atividade da Fosfomonoesterase Ácida (FosAci)	0,96	-0,18	0,29
Autovalores	2,85	1,03	

Segundo Cruz (2006b), tanto a análise de fatores, quanto a ACP, tenta estruturar e simplificar um número relativamente grande de variáveis representando-os por um número menor, expresso por combinações lineares dos dados originais, conservando o máximo possível de suas informações. No entanto, a análise de fatores tem como pressuposição a ideia de que a resposta de uma variável pode ser explicada por um conjunto de fatores comuns e por um fator específico (erro aleatório). Então, espera-se que as variáveis originais sejam agrupadas em subconjuntos de novas variáveis (fatores) não correlacionadas entre si, sendo que a análise fatorial objetiva encontrar os fatores de agrupamento. Dessa forma, variáveis em um fator são altamente correlacionadas entre si e possuem baixa correlação com as variáveis agrupadas em outro fator. As cargas fatoriais da cada fator comum são estimadas de modo que os fatores, em função das variáveis em que incidem, passam a ter interpretação, seja biológica, pedológica, etc. Neste sentido, os fatores retidos podem representar fatores de qualidade do solo, sendo inclusive nomeados, e utilizados para comparações dos efeitos de usos do solo e práticas de manejo (Brejda et al, 2000). Contudo, os fatores, assim como a qualidade do solo, não podem ser medidos diretamente, mas podem ser feitas inferências a partir da avaliação de atributos que os compõem, sendo estes utilizados como indicadores da qualidade do solo.

Os atributos do solo que tiveram maior peso (W_i) no IQS foram aqueles ligados à MOS (Tabela 7). O COL, a Ds e a FosAci tiveram praticamente os mesmos pesos, enquanto a SB, ligado à disponibilidade de nutrientes, teve um menor peso. Tais pesos são coerentes com a importância dos atributos orgânicos, físico e

microbiológicos para a sustentabilidade de atividades agrícolas sobre áreas mineradas, pois, na prática, tem sido observado que o processo de mineração causa grandes perdas da MOS, redução da atividade microbiana e compactação do solo (Thurman e Sencindiver, 1986; Schwenke et al., 2000a,b,c; Shukla et al., 2004; Lorenz e Lal, 2007; Shrestha e Lal, 2008). Tais características são de mais difícil correção e recuperação em curto prazo, o que é relativamente menos grave para a disponibilidade de nutrientes, que pode ser corrigida com práticas de adubação e calagem (CFSEMG, 1999). Brejda et al. (2000) também utilizaram a análise de fatores, combinada com análise discriminante, para a seleção de indicadores da qualidade do solo sob diferentes usos, selecionando os indicadores COT e NT. Da mesma forma, Imaz et al. (2010) também utilizaram a análise de fatores para selecionar indicadores da qualidade do solo sob diferentes sistemas de cultivo, selecionando a resistência a penetração, a matéria orgânica particulada e matéria orgânica total, na camada de 0-5 cm, como os mais sensíveis. Assim, a seleção e a atribuição de pesos aos atributos indicadores da qualidade do solo por meio da análise de fatores parecem ser viáveis na elaboração de um IQS para monitoramento de áreas mineradas de bauxita em recuperação com a cultura do cafeeiro.

O processo de mineração causou grande impacto sobre a qualidade do solo, reduzindo o IQS em cerca de 65 % em relação à área com cafeeiro pré-mineração (Figura 3). O cultivo de cafeeiro pré-mineração reduziu o IQS, mas não o suficiente para diferir da área de mata ($p > 0,1$). Isso pode estar relacionada à manutenção da MOS devido a ausência de preparo intensivo do solo e, portanto, de processos erosivos, e adoção de apenas capinas manuais e mantendo-se os restos vegetais na área. Além disso, a textura bastante argilosa e o clima relativamente ameno da região, especialmente no inverno, podem ter contribuído para a preservação da MOS, como observado por Lima et al. (2008) em uma região de mesma altitude no Vale do Rio Doce.

Houve interação significativa ($p < 0,05$) entre os tipos de adubação e os tipos de plantas de cobertura intercalares sobre a qualidade do solo. Não houve diferença ($p > 0,1$) entre as plantas de cobertura no efeito sobre a qualidade do solo, sendo que elas contribuíram para aumentar significativamente a qualidade do solo quando adubadas (Figura 3). As parcelas sem planta apresentaram IQS equivalente à testemunha e à área pós-reconfiguração. Porém, a combinação da adubação orgânica com a mineral (C+Q) elevou o IQS, compensando a ausência de plantas de cobertura.

Em geral, a adubação C+Q foi a que mais contribuiu para aumentar o IQS (Figura 3). No entanto, não houve diferença ($p > 0,1$) entre as adubações C, C+Q e Q quando se utilizou o estilosantes como planta de cobertura, e entre as adubações C e Q quando se utilizou o consórcio B+E.

O curto período de recuperação não permitiu que nenhum dos tratamentos elevasse a qualidade do solo a valores próximos das áreas pré-mineração. De fato, Schwenke et al. (2000a,b,c) observaram que longos períodos de tempo (em torno de 33 anos) foram necessários para que atributos relacionados à qualidade solo (MOS) em áreas mineradas de bauxita na Austrália atingissem valores próximos daqueles de áreas sem distúrbio. Contudo, no presente trabalho foi observado que o uso de plantas de cobertura e a adubação com cama de aviário, isolada ou combinada com a adubação mineral, mostrou uma recuperação da qualidade do solo, em média, de cerca de 23 % em relação ao cafeeiro pré-mineração, durante 21 meses de recuperação. Isto indica que a adoção destas práticas pode contribuir para acelerar a recuperação da qualidade do solo de áreas mineradas cultivadas com cafeeiro.

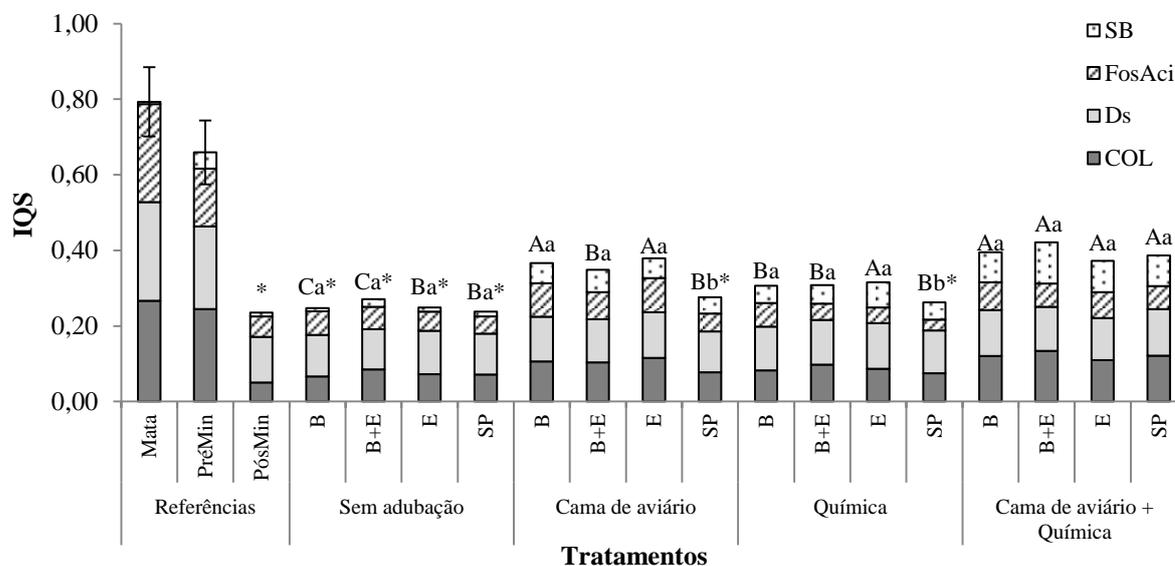


Figura 3: Médias dos Índices de Qualidade do Solo (IQS) e contribuição de cada indicador no IQS em áreas de mata nativa e cafeeiro pré-mineração (PréMin), área seis meses após a reconfiguração (PósMin) e em áreas com 19 meses em recuperação com cafeeiro sob diferentes adubações e plantas de cobertura intercalares (B = braquiária; E = estilosantes; B+E = consórcio braquiária e estilosantes; SP = sem planta de cobertura). Médias seguidas de mesma letra maiúscula dentro de cada tipo de planta de cobertura, e de letras minúsculas dentro de cada tipo de adubação não diferem a 10 % de probabilidade pelo teste Scott-Knott. COL = carbono orgânico lábil; Ds = densidade do solo; FosAci = atividade da fosfomocetase ácida; SB = soma de bases. * Não diferem da área pós-reconfiguração a 10 % de probabilidade pelo teste de Dunnett. Barras verticais indicam o desvio padrão nas referências pré-mineração (n=3).

Diversos trabalhos têm utilizado IQS's para avaliar a sustentabilidade de diferentes sistemas de cultivo agrícolas (Liebig et al., 2001; Andrews et al., 2002; Sharma et al., 2005; Bhardwaj et al., 2011; Fernandes et al., 2011), de diferentes tipos de fertilizantes minerais e orgânicos (Kang et al., 2005; Sharma et al., 2005; Mastro et al., 2007; Mastro et al., 2008), de diferentes plantas forrageiras (Navas et al., 2011) e a recuperação de áreas mineradas (Blecker et al., 2012). Semelhante aos resultados obtidos no presente estudo, a maioria destes trabalhos tem encontrado os melhores resultados (maiores IQS's) em condições de usos do solo e práticas de manejo que adicionam compostos orgânicos ao solo, como a adubação orgânica e sistemas de cultivo menos intensivos (cultivo mínimo).

Correlações significativas ($p < 0,1$) foram observadas entre o IQS e a produção de matéria seca (MS) das plantas de cobertura intercalares (Figura 4). A maior correlação foi observada para a produção de MS da braquiária ($r = 0,96$), seguida do estilosantes ($r = 0,93$) e do consórcio B+E ($r = 0,92$). Os valores elevados de correlação demonstram que o IQS calculado possui significado biológico e parece ser eficaz na avaliação da sustentabilidade do crescimento das plantas de cobertura intercalares no cafeeiro.

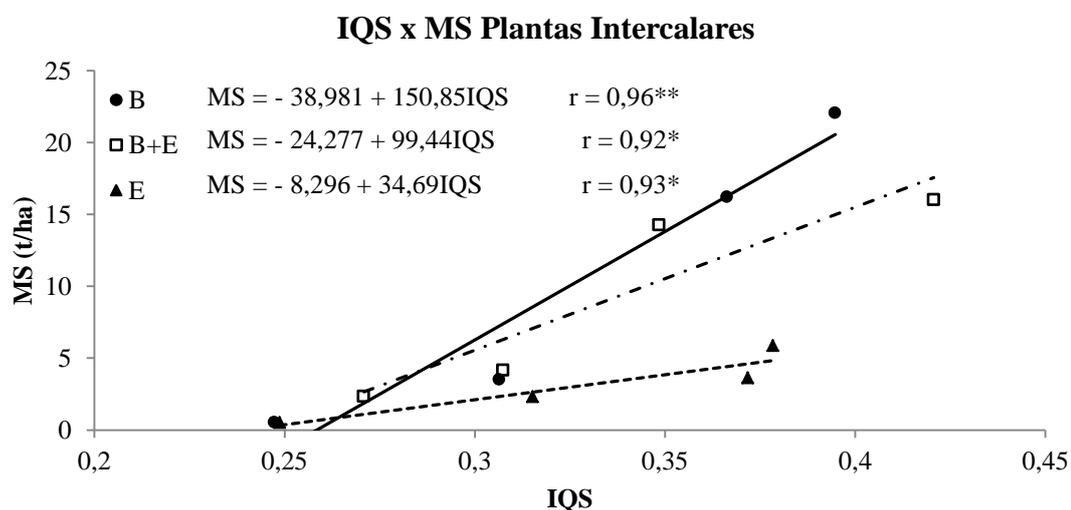


Figura 4: Produção acumulada de matéria seca (MS) de plantas de cobertura intercalares durante o primeiro ano após a semeadura em função do Índice de Qualidade do Solo (IQS) em área com cultivo de cafeeiro após mineração de bauxita. B – braquiária; B+E – consórcio braquiária e estilosantes; E – estilosantes. ** e * Significativo a 5 e 10 % de probabilidade pelo teste t ($n = 4$), respectivamente.

Menores valores de correlação, porém significativos ($p < 0,1$), foram observados entre o IQS e as características de crescimento do cafeeiro (Figura 5). A maior correlação foi observada para a altura das plantas ($r = 0,68$), seguido do número de ramos plagiotrópicos ($r = 0,55$), do diâmetro do caule ($r = 0,53$) e do número de nós dos ramos ($r = 0,43$). Relações positivas têm sido observadas entre IQS's e a produção de grãos para as culturas do trigo e milho (Masto et al., 2007; Bhardwaj, 2011), arroz (Li et al., 2013) e soja (Bhardwaj, 2011). A altura das plantas de cafeeiro tem sido um parâmetro que apresenta boa correlação com a produção (Paulo et al., 2001; Carvalho et al., 2010). Dessa forma, o IQS pode ser útil para avaliar a sustentabilidade da produção do cafeeiro sobre áreas mineradas de bauxita.

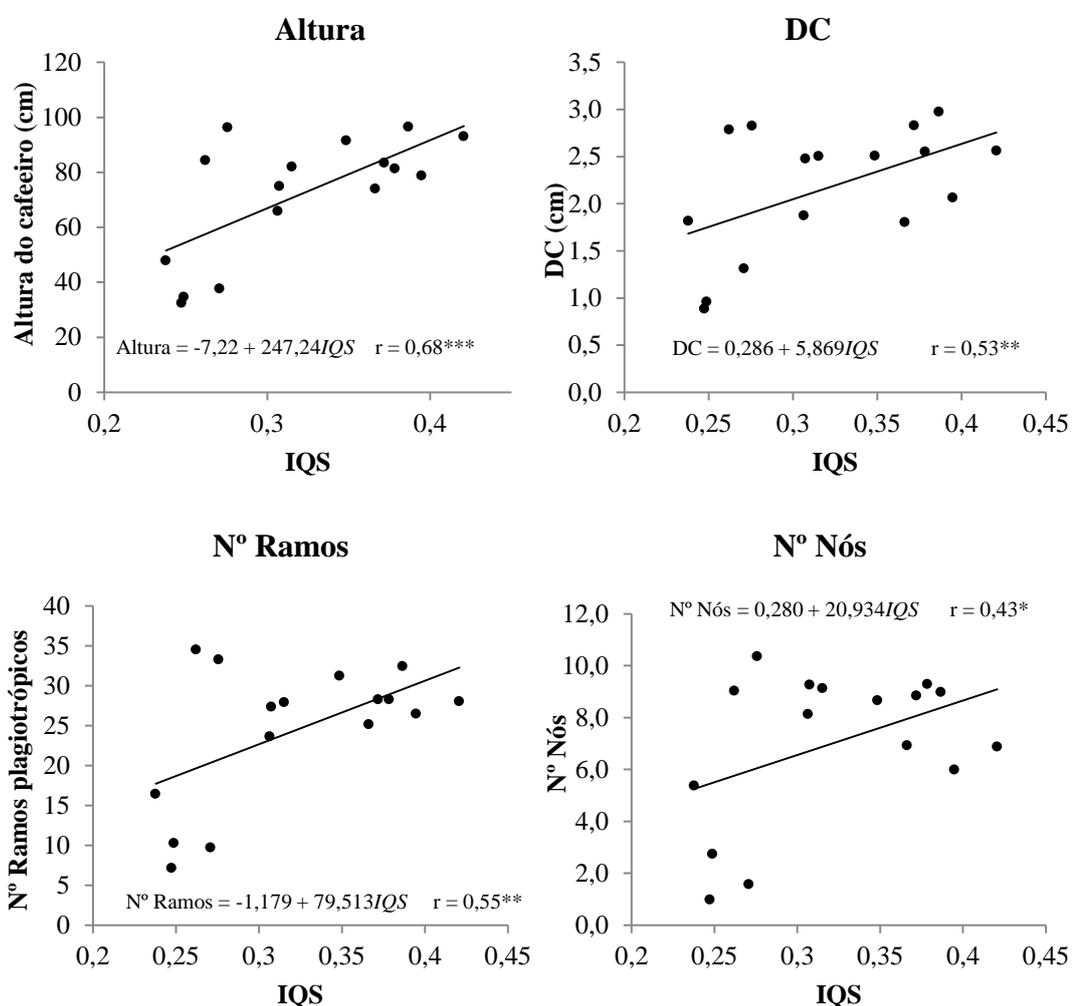


Figura 5: Relação linear entre o Índice de Qualidade do Solo (IQS) e o crescimento do cafeeiro após 21 meses em áreas mineradas de bauxita em recuperação com diferentes tipos de adubação e plantas de cobertura intercalares. DC = diâmetro do caule ao nível do solo. *, ** e *** Significativo a 10, 5 e 1 % de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

Os valores de correlação relativamente mais baixos entre o IQS e o crescimento do cafeeiro podem estar associados ao maior crescimento das plantas de cobertura onde a qualidade do solo é mais alta, gerando um efeito competitivo negativo com o cafeeiro, especialmente a braquiária. Além disso, o preparo do solo para o plantio e as adubações em cobertura (tratamentos C+Q e Q) localizados na linha de plantio do cafeeiro podem ter gerado ligeiras diferenças entre a qualidade do solo na linha de plantio e nas entrelinhas do cafeeiro, onde foram feitas as amostragens de solo. Isto demonstra que uma melhor associação da qualidade do solo e o crescimento do cafeeiro talvez possa ser obtida adotando-se também amostragens mais detalhadas, incluindo a linha de plantio.

4. CONCLUSÕES

O grupo mínimo de indicadores orgânicos, químicos, físicos e microbiológicos da qualidade do solo de áreas mineradas de bauxita em recuperação pode ser composto pelo carbono orgânico lábil (COL), a soma de bases (SB), a densidade do solo (Ds) e a atividade da enzima fosfomocetase ácida.

A mineração de bauxita causa grande impacto sobre a qualidade do solo, reduzindo em cerca de 65 % o índice de qualidade do solo (IQS) em relação à áreas cultivadas com cafeeiro sem distúrbio (pré-mineração).

As plantas de cobertura intercalares contribuem para recuperar a qualidade do solo de áreas mineradas de bauxita aumentando o IQS, porém somente quando adubadas, e não há diferenças entre o uso da braquiária, estilosantes ou o consórcio braquiária-estilosantes.

A adubação com cama de aviário é a que mais contribui para aumentar a qualidade do solo, principalmente quando combinada com a adubação mineral e utilizando-se plantas de cobertura nas entrelinhas do cafeeiro.

O IQS baseado na análise de fatores para a seleção e ponderação dos indicadores da qualidade do solo apresenta boa sensibilidade às práticas de recuperação e correlaciona-se positivamente com o crescimento das plantas de cobertura e do cafeeiro, podendo ser viável no monitoramento da recuperação de áreas mineradas de bauxita cultivadas com cafeeiro.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEF, K. Soil respiration. In: ALEF, K.; NANNIPIERI, P. (Eds.). **Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry**. London: Academic Press, 1995. p. 214-219.
- ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; CRISÓSTOMO, L. A.; SOUZA, I. H.; TEIXEIRA, A. S. Índice de qualidade de água, uma proposta para o vale do rio Trussu, Ceará. **Rev. Ci. Agron.**, 36(2): 135-142, 2005.
- ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 24: 857-865, 2000.
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; MITCHELL, J.P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agric. Ecosys. Environ.**, 90: 25-45, 2002.
- ANDREWS, S. S.; CARROL, C. R. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management. **Ecol. Applic.**, 11(6): 1573-1585, 2001.
- BHARDWAJ, A. K.; JASROTIA, P.; HAMILTON, S. K.; ROBERTSON, G. P. Ecological management of intensively cropped agro-ecosystems improves soil quality with sustained productivity. **Agric. Ecosyst. Environ.**, 140: 419-429, 2011.
- BOHN, H. L.; MCNEAL, B. L.; O'CONNOR, G. A. **Soil Chemistry**. ed. 3. New York: John Wiley & Sons, 2001. 307 p.
- BREJDA, J. J.; MOORMAN, T. B.; KARLEN, D. L.; DAO, T. H.; Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and Southern High Plains. **Soil Sci. Soc. Am. J.**; 64: 2115-2124, 2000.
- BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C., TEIXEIRA, J. P. F., FURLANI, P. R., GALLO, J. P. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 48 p. (Boletim Técnico 78).
- BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D. B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index, for agricultural systems. **Austr. J. Agric. Res.**, 46: 1459-1466, 1995.
- BLECKER, S. W.; STILLINGS, L. L.; AMACHER, M. C.; IPPOLITO, J. A.; DECRAPPEO, N. M.; Development of vegetation based soil quality indices for mineralized terrane in arid and semi-arid regions. **Ecol. Indic.**, 20: 65-74, 2012.
- CARNEIRO, M. A. C.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; SOARES, A. L. L. Carbono orgânico, nitrogênio total, biomassa e atividade microbiana do solo em duas cronossequências de reabilitação após a mineração de bauxita. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 32: 621-632, 2008.
- CARVALHO, A. M.; MENDES, A. N. G.; CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E.; GONÇALVES, F. M. A.; FERREIRA, A. D. Correlação entre crescimento e produtividade de cultivares de café em diferentes regiões de Minas Gerais, Brasil. **Pesq. Agropec. Bras.**, 45(3): 269-275, 2010.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS – CFSEMG. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. 359 p.

CORREIA, M. E. F; ANDRADE, A. G. Formação de serapilheira e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.) 2 ed. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 137-158.

CRUZ, C. D. **Programa Genes: Biometria**. Viçosa: UFV, 2006a. 382 p.

CRUZ, C. D. **Programa Genes: Análise multivariada e simulação**. Viçosa: UFV, 2006b. 175 p.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KNABNER, I. K. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilization. **Plant Soil**, 268: 319-328, 2005.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21. (Special publication, 35).

DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Appl. Soil Ecol.**, 15: 3-11, 2000.

DUMANSKI, J.; PIERI, C. Land quality indicators: research plan. **Agric Ecosyst. Environ.**, 81: 155-162, 2000.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biol. Biochem.**, 20(5): 601-606, 1988.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Phosphatases in soils. **Soil Biol. Biochem.**, 9: 167-172, 1977.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análises de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 1997. 212 p.

FAVARETTO, N.; MORAES, A.; MOTTA, A. C.; PREVEDELLO, B. M. S. Efeito da revegetação e da adubação de áreas degradada na produção de matéria seca e na absorção de nutrientes. **Pesq. Agropec. Bras.** 35: 299-306, 2000a.

FAVARETTO, N.; MORAES, A.; MOTTA, A. C.; PREVEDELLO, B. M. S. Efeito da revegetação e da adubação de áreas degradada na fertilidade do solo e nas características da palhada. **Pesq. Agropec. Bras.** 35: 289-297, 2000b.

FERNANDES, J. C.; GAMERO, C. A.; RODRIGUES, J. G. L.; MIRÁS-AVALOS, J. M. Determination of the quality index of a Paleudult under sunflower culture and different management systems. **Soil Till. Res.**, 112: 167-174, 2011.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ci. Agrotec.**, 35(6): 1039-1042, 2011.

HAYNES, R. J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. **Soil Biol. Biochem.**, 32: 211-219, 2000.

- IMAZ, M. J.; VIRTO, I.; BESCANSÀ, P.; ENRIQUE, A.; FERNANDEZ-UGALDE, O.; KARLEN, D. L. Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid Mediterranean cropland. **Soil Till. Res.**, 107: 17-25, 2010.
- JOHN, B.; YAMASHITA, T.; LUDWIG, B.; FLESSA, H. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. **Geoderma**, 128: 63-79, 2005.
- KANG, G. S.; BERI, V.; SIDHU, B. S.; RUPELA, O. P. A new index to assess soil quality and sustainability of wheat-based cropping systems. **Biol. Fertil. Soils**, 41: 389-398, 2005.
- KARLEN, D. L.; WOLLWENHAUPT, N. C.; ERBACH, D. C.; BERRY, E. C. SWAN, J. B.; EASH, N. S.; JORDAHL, J. L. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till. **Soil Till. Residue**, 31: 149-167, 1994.
- LAL, R.; STEWART, B. A. Need for land restoration. **Advan. Soil Sci.**, 17: 1-11, 1992.
- LI, P.; ZHANG, T.; WANG, X.; YU, D. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. **Soil Till. Res.**, 126: 112-118, 2013.
- LIEBIG, M. A.; VARVEL, G. E.; DORAN, J. W.; A simple performance-based index for assessing multiple agroecosystem functions. **Agron. J.**, 93: 313-318, 2001.
- LIMA, A. M. N.; SILVA, I. R.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; MENDONÇA, E. S.; DEMOLINARI, M. S. M.; LEITE, F. P. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do Rio Doce-MG. **R. Bras. Ci. Solo**, 32: 1053-1063, 2008.
- LORENZ, K., LAL, R. Stabilization of organic carbon in chemically separated pools in reclaimed coal mine soils in Ohio. **Geoderma**, 141: 294-301, 2007.
- MASTO, R. E.; CHHONKAR, P. K.; SINGH, D.; PATRA, A. K. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. **Environ. Monit. Assess.**, 136: 419-435, 2008.
- MASTO, R. E.; CHHONKAR, P. K.; SINGH, D.; PATRA, A. K. Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol. **Agric. Ecosys. Environ.**, 118: 130-42, 2007.
- NAVAS, M.; BENITO, M.; RODRÍGUEZ, I.; MASAGUER, A. Effect of five forage legume covers on soil quality at the Eastern plains of Venezuela. **Applied Soil Eco.**, 49: 242-249, 2011.
- MATOS, E. S.; MENDONÇA, E. S.; LIMA, P. C.; COELHO, M. S.; MATEUS, R. F.; CARDOSO, I. M. Green manure in coffee systems in the region of Zona da Mata, Minas Gerais: characteristics and kinetics of carbon and nitrogen mineralization. **R. Bras. Ci. Solo**, 32: 2027-2035, 2008.
- MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 297 p.

PASSOS, R. R.; RUIZ, H. A.; CANTARUTTI, R. B.; MENDONÇA, E. S. Carbono orgânico e nitrogênio em agregados de um Latossolo Vermelho distrófico sob duas coberturas vegetais. **R. Bras. Ci. Solo**, 31: 1109-1118, 2007.

PAULO, E. M.; BERTON, R. S.; CAVICHIOLI, J. C. BULISANI, E. A.; KASAI, F. S. Produtividade do café apoaã em consórcio com leguminosas na região da Alta Paulista. **Bragantia**, 60: 195-199, 2001.

PAVAN, M. A.; CHAVES, J. C. P.; MESQUITA FILHO, L. Manejo da adubação para a formação de lavouras cafeeiras. **Pesq. Agropec. Bras.** 21: 33-42, 1986.

REIS, L. L. **Monitoramento da Recuperação Ambiental de Áreas de Mineração de Bauxita na Floresta Nacional de Sacará-Taquera, Porto Trombetas (PA)**. Seropédica: UFRRJ, 2006. 159 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

SANTOS, J. C. F.; MARCHI, G.; MARCHI, E. C. S. **Cobertura do solo no controle de plantas daninhas do café**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2008. 56 p. (Documentos, 226).

RESENDE, L. A.; ROCHA, M. S.; FREITAS, G. B.; SANTOS, R. H. S. Uso racional da cama-de-frango na produção de alimentos pelos avicultores familiares da Zona da Mata Mineira. In: SIMPÓSIO DE EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA, 7. Viçosa, 2009. **Anais...** Viçosa: UFV, 2009. (CD-ROM).

RICCI, M. S. F.; ALVES, B. J. R.; MIRANDA, S. C.; OLIVEIRA, F. F. Growth rate and nutritional status of an organic coffee cropping system. **Sci. Agric.**, 62(2): 138-144, 2005.

SEYBOLD, C. A., MAUSBACH, M. J.; KARLEN, D. L.; ROGERS, H. H. Quantification of soil quality. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLET, R. F.; STEWART, B. A. (Eds.). **Soil processes and the carbon cycle**, Boca Raton, Florida: CRC Press, p. 387-404, 1998.

SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter lability in a Tropical Oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density, and magnetic fractionations. **Soil Sci.**, 162: 795–807, 1997.

SHARMA, K. L.; MANDAL, U. K.; SRINIVAS, K.; VITTAL, K. P. R.; MANDAL, B.; GRACE, J. K.; RAMESH, V. Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. **Soil Till Res.**, 83: 246-259, 2005.

SHRESTHA, R. K.; LAL, R. Land use impacts on physical properties of 28 years old reclaimed mine soils in Ohio. **Plant Soil**, 306: 249-260, 2008.

SHUKLA, M. K.; LAL, R.; EBINGER, M. Soil quality indicators for reclaimed minesoils in southeastern Ohio. **Soil Sci.**, 169:133-142, 2004.

SCHWENKE, G. D.; MULLIGAN, D. R.; BELL, L. C. Soil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite-mined land at Weipa. I. Initial changes to soil organic matter and related parameters. **Aust. J. Soil Res.**, 38: 345-369, 2000a.

SCHWENKE, G. D.; AYRE, L.; MULLIGAN, D. R.; BELL, L. C. Soil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite-mined land at Weipa. II. Soil organic matter dynamics in mine. **Aust. J. Soil Res.**, 38: 371-393, 2000b.

SCHWENKE, G. D.; MULLIGAN, D. R.; BELL, L. C. Soil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite-mined land at Weipa. III. Simulated long-term soil organic matter development. **Aust. J. Soil Res.**, 38: 395-410, 2000c.

STENBERG, B. Monitoring soil quality of arable land: microbiological indicators. **Soil Plant Sci.**, 49: 1-24, 1999.

THURMAN, N. C.; SENCINDIVER, J. C. Properties, classification and interpretations of minesoils at two sites in West Virginia. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 50: 181-185, 1986.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS, 2002. v. 2, p. 195-276.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communic. Soil Sci. Plant Anal.**, 19: 1467-1476, 1988.

CONCLUSÕES GERAIS

A complementação da adubação com cama de aviário reduz as perdas de água e solo por escoamento superficial e gera ganhos adicionais no crescimento de forrageiras sobre áreas mineradas de bauxita, mas um adequado programa de reposição de nutrientes deverá ser adotado para que não haja um esgotamento nutricional do solo a médio e longo prazo após a devolução da área recuperada.

As plantas forrageiras contribuem para recuperar os atributos orgânicos nos agregados do solo, especialmente o estilosantes cv. Campo Grande, porém este apresenta crescimento inicial lento, o que não permite seu estabelecimento em consórcio com a *Brachiaria brizantha* cv. Piatã sobre áreas mineradas em recuperação. Portanto, novos estudos devem ser implementados visando estabelecer o consórcio de gramíneas e leguminosas em áreas mineradas de bauxita.

A adubação com cama de aviário, isolada ou combinada com a mineral, aumenta o crescimento de plantas de cobertura intercalares, gerando rápida cobertura do solo, o que reduz as perdas de água e solo por escoamento superficial em áreas mineradas de bauxita em recuperação com cafeeiro. Além disso, o crescimento do cafeeiro adubado com cama de aviário se equipara, de modo geral, ao crescimento daquele com adubação mineral.

As plantas de cobertura intercalares ao cafeeiro contribuem para recuperar a qualidade do solo quando adubadas, e a braquiária contribui para reduzir os processos erosivos, mas por outro lado reduz o crescimento do cafeeiro quando plantada isolada, o que, em geral, é menos frequente no consórcio braquiária-estilosantes. Desse modo, o consórcio da braquiária com leguminosa como planta de cobertura intercalar pode ser uma alternativa viável para melhorar a sustentabilidade do cultivo de cafeeiro sobre áreas mineradas de bauxita e deve ser melhor estudado, visando aumentar a contribuição da leguminosa e evitar competição com o cafeeiro.

A seleção e atribuição de pesos a um grupo mínimo de indicadores orgânicos, químicos, físicos e microbiológicos da qualidade do solo utilizando análises estatísticas uni e multivariadas, permite o cálculo de um índice de qualidade do solo (IQS) que se correlaciona com o crescimento das plantas de cobertura intercalares e do cafeeiro e é sensível aos impactos da mineração e aos efeitos do manejo de recuperação da área minerada. Assim, o IQS pode ser útil na avaliação das práticas

de recuperação e no monitoramento da sustentabilidade do cultivo de cafeeiro em áreas mineradas de bauxita.