



GONÇALVES JOTAMO MARRENJO

**COMPORTAMENTO DO CARBONO E
NITROGÊNIO EM GLEISSOLOS SOB
DIFERENTES USOS DA TERRA NO SUL DE
MINAS GERAIS**

LAVRAS-MG

2015

GONÇALVES JOTAMO MARRENJO

**COMPORTAMENTO DO CARBONO E NITROGÊNIO EM
GLEISSOLOS SOB DIFERENTES USOS DA TERRA NO SUL DE
MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em recursos ambientais e uso de terra, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Yuri Lopes Zinn

LAVRAS-MG

2015

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Marrenjo, Gonçalves Jotamo.

Comportamento do carbono e nitrogênio em Gleissolos sob
diferentes usos da terra no sul de Minas Gerais / Gonçalves Jotamo
Marrenjo. – Lavras : UFLA, 2015.

67 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de
Lavras, 2015.

Orientador(a): Yuri Lopes Zinn.

Bibliografia.

1. Oryza sativa L. 2. Phaseolus vulgaris L. 3. Floresta
semidecidual. 4. Matéria orgânica do solo. I. Universidade Federal
de Lavras. II. Título.

GONÇALVES JOTAMO MARRENJO

**COMPORTAMENTO DO CARBONO E NITROGÊNIO EM
GLEISSOLOS SOB DIFERENTES USOS DA TERRA NO SUL DE
MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em recursos ambientais e uso de terra, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 11 de Agosto de 2015

Dr. Carlos Alberto Silva
Dr. Plínio César Soares

DCS/UFLA
EPAMIG

Dr. Yuri Lopes Zinn
Orientador

**LAVRAS - MG
2015**

Aos meus pais, Lúcia Maholela Tafula Guirruta e Jeremias Jotamo Marrenjo (*in memoriam*), pelos ensinamentos, conselhos e infinita bondade.

À minha esposa Elsa Jane Marrenjo, ao meu filho Lárnél Gonçalves Marrenjo, que deles me orgulho pelo infinito amor e carinho, companheirismo, compreensão e todo amparo prestado.

Aos meus irmãos Hortência, Iolanda, Dulcisária, Helder e Saquina, pelos conselhos e apoio constante.

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao departamento de Ciência de Solo (DCS), pela oportunidade concedida para a conquista e efetivação do grau de Mestre.

À Universidade Pedagógica de Moçambique, em particular a Direção da Delegação de Massinga, pela permissão da realização desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa/Ministério de Ciência e Tecnologia (CNPq/MCT), e à Direção das Finanças da Universidade Pedagógica, pela bolsa concedida para a realização desta pesquisa.

Ao Professor Yuri Lopes Zinn, pela calorosa orientação, paciência, e grande apoio em toda minha formação.

À EPAMIG- Lambari, especialmente aos Srs. André Martins Santos Almeida Cruz e Pedro Ferreira Neto.

À Dirce de Cássia Corrêa Macedo (secretária da DCS), pelo muito apoio e atenção prestada desde o início até ao fim do meu curso.

A Eduane José de Pádua pelo grande apoio, conselhos, ensinamentos, colaboração e amparo em toda minha formação.

Aos professores Nilton Curi, Carlos Alberto Silva, João José Granate de Sá e Melo Marques, Luiz Roberto Guimarães Guilherme e Valdemar Faquin pelos ensinamentos calorosos.

A todos os professores do Departamento de Ciências de Solo, pelos ensinamentos transmitidos, convivência e atenção prestados.

Ao professor Alfredo Scheid Lopes, Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães e Dr. Francisco Dias Nogueira, pela disponibilização de material e esclarecimento das dúvidas.

A todos técnicos de Laboratórios do Departamento, em especial a Srs Dulce, Doroteo, Pezão, Cristina, Humberto, Gilson, Lulu e Lívia pela atenção, ensinamentos e disponibilização de materiais usados durante as análises.

A todos os funcionários do Departamento, em particular à Sra. Denise e Bete pela convivência prestada.

A minha esposa Elsa Jane Marrenjo, meu filho Lárnel Gonçalves Marrenjo, meus pais Jeremias Jotamo Marrenjo e Lúcia Maholela Tafula Guirruta, meus irmã Ana da Graça Marrenjo, Iolanda Jotamo Marrenjo, Dulcisaria Jotamo Marrenjo, Hélder Zacarias Marrenjo, Saquina Maholela, aos meus cunhados Orlando, Narciso, meus sobrinhos Rute Muianga, Anucha Muianga, Ax Duce e Ayat Dulcisaria pelo amparo desde o meu nascimento até o dia de hoje.

Aos meus padrinhos Antônio Palate e Amina Palate pelos conselhos e apoio moral.

A todos os meus familiares do lado da minha esposa em especial aos pais Jane Mungeleze e Ginatória Lihaha.

A Alba L. A. Skorupa (DCS, UFLA) pela revisão da bibliografia.

Aos meus amigos da UP, Sarmento Maziliva, Armando Laita, Roberto Nhamussua, Elisa Mavulule, Afonso Munguambe, Carlitos, Manuel Tábua, Iceu Carlos pelo apoio amoral.

Aos meus amicíssimos da UFLA Eduane Pádua, Diego Tassinari, Josimar Lessa, Franciane Cogo, Marla de Araujo, Jordana Castro, Taylor Lima de Souza, Zélio de Rezende Souza pelo esclarecimento de dúvidas encontradas.

A Ediu da Silva, Fábio Bispo, Giovana Poggere, Henrique Maluf, André Andrade, Francisco Hélcio, Luciane da Silva, Marisangela Barbosa, Erica da Silva, Sérgio Silva e Maíra pelo apoio moral.

A todos os africanos em Lavras, especialmente ao Nelson Mesquita, Carlos Balate, Denilson Mavaieie, Constantino Senete, Otília Tamele pela minha recepção, companherismo e diversão durante a minha estadia.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para o sucesso da minha formação.

A DEUS, por tudo que me oferece (Amém).

RESUMO

O carbono orgânico do solo (COS) é um indicador importante da qualidade do solo, e fonte de nutrientes para as plantas e organismos do solo. Assim, é necessário o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis que permitam a conservação ou sequestro do COS, como o cultivo mínimo, rotação de culturas e uso de fertilizantes em doses adequadas. Em solos de várzea, anaerobiose sazonal ou constante por inundação modifica a atividade da comunidade microbiana, que se torna menos eficiente em decompor o COS, assim resultando em sua acumulação. O objetivo desta pesquisa foi de estudar o efeito do uso da terra sobre o COS de um Gleissolo no Sul de Minas Gerais. Os tratamentos constituíram-se de Gleissolo sob mata nativa (referência), sob cultivo de arroz inundado e de feijão, e de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob mata nativa, usado como referência de um solo aeróbico. As amostras foram coletadas nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm para análises físicas, químicas, de COS e N-total. O delineamento experimental usado foi o inteiramente casualizado, com 4 tratamentos e 3 repetições. A correção e fertilização nas áreas de Gleissolos cultivados resultou no aumento do pH, menor saturação por alumínio (m) e maior soma de bases (SB), em relação o Gleissolo sob mata. Maiores teores e estoques de COS e N foram observados na mata do Gleissolo, em comparação com os Gleissolos cultivados com arroz e feijão, indicando perdas significativas de matéria orgânica do solo. Com relação aos estoques de COS, a mata de Gleissolo e a mata de Argissolo não diferiram significativamente, uma vez que aquela apresentou simultaneamente maiores teores de COS, mas menor densidade do solo. Isto sugere que a inundação teve menor influência na retenção de COS e N do que o esperado, na região de estudo.

Palavras-Chave: *Oryza sativa* L. *Phaseolus vulgaris* L. Floresta semidecidual. Solos inundados. Matéria orgânica do solo.

ABSTRACT

Soil organic carbon (SOC) is an important indicator of soil quality, and a nutrient source for plants and soil organisms. Thus, it is critical to develop sustainable agricultural practices favoring SOC conservation or sequestration, such as minimal tillage, crop rotations and judicious fertilizer use. In lowlands, seasonal or permanent anoxia due to flooding changes microbial communities, which become less efficient in decomposing SOC, causing its accumulation. This research aimed to study land use effects on SOC in a gley soil in southern Minas Gerais, Brazil. Treatments comprised a gley soil under native forest vegetation, common beans and flooded rice, as well as a nearby Ultisol under native forest as a reference of aerated soils. Soil samples were taken at the 0-5 cm, 5-10, 10-20 and 20-40 cm depths for physical, chemical, SOC and N analyses. The experimental design was completely randomized, with 4 treatments in triplicate. Liming and fertilization increased soil pH and base saturation, and decreased aluminum saturation in cultivated gleys. Higher concentrations and stocks of SOC and N occurred in the gley soil under native vegetation than under rice and bean crops. The Ultisol and the gley soil under native vegetation did not differ in SOC stocks, since the latter showed simultaneously higher SOC concentrations but lower bulk density. This trend suggests that flooding and anoxia had lower importance for SOC and N retention than previously expected, in the study area.

Keywords: *Oryza sativa* L. *Phaseolus vulgaris* L. Semideciduous forest.

Flooded soils. Soil organic matter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Imagem aérea das áreas amostrais	26
Figura 2 (A) Canal de drenagem artificial e (B) água para irrigação.....	27
Figura 3 Vista da Fazenda da Epamig	28
Figura 4 Trincheiras abertas para coleta de amostras.....	29
Figura 5 (A) Jogo de peneiras.....	30
Figura 6 (A) Agitador horizontal; e (B) coleta de alíquota de 10 mL de argila e C- argila.....	31
Figura 7 Amostras de solo sob arroz inundado.....	32
Figura 8 Almofariz de ágata e peneira (A) e aparelho TOC CUBE (B).....	35
Figura 9 (A) Bloco digestor; (B) destilador e (C) bureta.....	36
Figura 10 Fração areia sob vegetação nativa.....	38
Figura 11 Teores de COS sob diferentes usos e profundidades.....	48
Figura 12 Teores de nitrogênio sob diferentes usos e profundidades.....	48
Figura 13 Razão C:N sob diferentes usos e profundidades.....	49
Figura 14 Perdas percentuais de COS e N em Gleissolo.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Potenciais-padrão de meias reações de redução no solo, a partir da aceitação de elétrons advindos da decomposição orgânica.....	22
Tabela 2. Teores médios de areia, argila, silte e classe textural do solos sob diferentes tratamentos e profundidades.....	37
Tabela 3. Valores médios de indicadores de acidez do solo para diferentes manejos e profundidades.....	39
Tabela 4. Valores médios de propriedades químicas do solo para diferentes tratamentos e profundidades.....	40
Tabela 5. Valores médios de micronutrientes e S do solo para diferentes tratamentos e profundidades.....	42
Tabela 6. Níveis de significância da ANOVA para as características físicas do solo.....	43
Tabela 7. Efeito dos tratamentos nas propriedades físicas do solo.....	44
Tabela 8. Níveis de significância da ANOVA para teores de COS, N e razão C:N.....	45
Tabela 9. Teores de COS, N e razão C:N sob diferentes usos e profundidades.....	46
Tabela 11. Níveis de significância da ANOVA para estoques de COS e N.....	51
Tabela 12. Estoques de COS e N para diferentes profundidades-padrão, após correção para a compactação do solo (massa equivalente).....	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 O carbono orgânico do solo (COS).....	15
2.2 Solos anaeróbios.....	17
2.3 Produção de arroz inundado no mundo.....	24
2.4 Justificativa, objetivo e hipótese.....	25
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1 Caracterização da área de amostragem.....	26
3.2 Análises de solo.....	29
3.2.1 Estabilidade de agregados em água.....	29
3.2.2 Análise Granulométrica.....	30
3.2.3 Densidade do solo (Ds).....	30
3.2.4 Determinação do pH do solo em água.....	31
3.2.5 Cálcio, Magnésio e Alumínio trocáveis.....	31
3.2.6 Potássio disponível (K).....	33
3.2.7 Fósforo disponível (P).....	33
3.2.8 Micronutrientes (Fe, Zn, Mn e Cu) e S.....	33
3.2.9 Determinação da acidez potencial (H + Al).....	34
3.2.10 Determinação de teores de C total.....	34
3.2.11 Determinação de nitrogênio total em solo.....	35
3.3 Delineamento experimental e análise estatística.....	36

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1 Caracterização do solo.....	37
4.2 Alterações na agregação e densidade do solo devido ao manejo.....	43
4.3 Alteração no carbono orgânico do solo (COS), nitrogênio total e razão C:N.....	45
5 CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

O solo é um corpo natural e aberto, que comumente oferece ambiente favorável para o desenvolvimento dos vegetais, que encontra-se intimamente ligado aos processos que ocorrem na atmosfera, hidrosfera, litosfera e biosfera (SILVA e MENDONÇA, 2007). Assim, o solo é considerado como a camada de material biologicamente ativo que cria boas condições para a produtividade dos agroecossistemas (LOPES e GUILHERME, 2007). Embora o solo tenha aparência de um material inerte cuja composição reflete o material de origem, ele forma-se e desenvolve-se em relação a vários fatores bióticos e abióticos. O solo é composto por uma parte viva (biótica), dominada pelas raízes, macro e microrganismos, e uma parte abiótica, subdividida em fase sólida (composta por substâncias minerais e orgânicas), fase líquida (solução ou água do solo), e fase gasosa. O solo é importante não só para o crescimento dos vegetais, mas também para a regulação do ciclo da água e de vários elementos químicos (C, N, P, Ca, Mg, etc.). Ainda, o solo apresenta uma grande capacidade de armazenar e reciclar substâncias inorgânicas e orgânicas, como nutrientes, substâncias húmicas e também elementos e substâncias tóxicas. O solo é o maior reservatório terrestre de carbono orgânico. Na maioria dos solos, o regime de oxidação é o aeróbico, mas alguns são anaeróbios, por serem inundados permanente ou periodicamente, o que dificulta a difusão de oxigênio e resulta em sua menor difusão no perfil. Estes solos são propícios para o desenvolvimento e produtividade de poucas culturas, sendo o arroz (*Oryza sativa* L.) a principal. Os solos de várzea, geralmente, localizam-se em relevo plano propício para inundação, e a anaerobiose restringe a gama de organismos responsáveis pela decomposição do carbono orgânico do solo (COS), resultando na baixa atividade microbiana e no acúmulo de COS. No Brasil, o estudo sobre COS e sua dinâmica vêm sendo desenvolvido em solos cultivados aeróbicos, e poucos estudos envolvem os solos em condições anaeróbicas. Segundo Silva, Sousa e Pocojeski (2008), existe grande dificuldade em interpretar detalhadamente os fenômenos que ocorrem na dinâmica de COS em ambientes anaeróbicos. As referências existentes em solos alagados comumente tratam de

estudos relacionados à dinâmica da água e nutrientes, propriedades físicas ou compactação desses solos, e muito pouco sobre a dinâmica, sequestro e aporte de COS (LIMA; CABRAL; MIGUEZ, 2001; NASCIMENTO et al., 2009). Abreu e Lopes (1987) realçam que, embora exista grande dificuldade em estudar os processos físico-químicos envolvidos, o seu conhecimento é imprescindível para permitir o uso eficiente da calagem e adubação nestes solos, geralmente voltados ao cultivo e produção do arroz inundado. Neste contexto, o presente trabalho teve o objetivo de estudar a retenção do COS em um Gleissolo sob cultivo de arroz inundado em Lambari, MG, em comparação ao cultivo de feijão, e à área sob mata nativa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O carbono orgânico do solo (COS)

A maior porção do C total dos solos sob clima quente e úmido encontra-se em vários compartimentos da matéria orgânica, e apenas uma parte como carbonatos e bicarbonatos em solos alcalinos. O COS é um material natural, principal componente da matéria orgânica do solo proveniente de resíduos vegetais, animais e da biomassa microbiana depositados no solo. O processo de fotossíntese resulta em uma complexidade de compostos orgânicos (açúcares, proteínas, óleos, etc.), que chegam ao solo como resíduos vegetais, sendo usados pelos organismos heterotróficos em reações de oxidação respiratória que assim adquirem energia e C para sua biomassa como resultado dos processos de incorporação e decomposição de resíduos. O COS pode ocorrer na forma dissolvida, coloidal ou como carbono orgânico particulado (DIECKOW et al., 2004). O tempo médio de residência do COS nesses compartimentos é determinado pela sua estabilidade bioquímica e sua localização espacial em relação aos microrganismos do solo. A proteção do COS humificado e solúvel é conferida pela sua ligação com a fração argila, formando complexos orgânico-minerais no solo, enquanto os agregados do solo protegem o COS particulado do ataque microbiano (ZINN et al., 2007). Segundo Roscoe e Machado (2002), o COS compreende matéria orgânica em diversos estágios de decomposição microbiana, incluindo compostos humificados e materiais carbonizados, associados ou não à fração mineral. O COS é de extrema importância, pois é principal fonte de nutrientes, energia e C para microrganismos e outros seres vivos do solo. Ainda, o COS intervém no balanço de N, influencia a infiltração e retenção de água, melhora a resistência do solo à erosão, é a fonte de cargas negativas que adsorvem os nutrientes no solo, complexam metais pesados, estabilizam o pH do solo, aumentam a agregação, porosidade e aeração e reduzem a variação da temperatura do solo (SIX; ELLIOT; PAUSTIAN, 2000; SANTOS, 2007; SIQUEIRA; SOARES; SILVA, 2008; AMORIM, 2009).

O COS é, portanto, um dos principais indicadores da qualidade dos aspectos físicos, químicos e biológicos do solo (NASCIMENTO et al., 2009; ROSA et al., 2011; DALCHIAVON et al., 2013). Assis et al. (2006) afirmaram que o sequestro de COS contribui significativamente para a qualidade ambiental, pela diminuição da emissão de gases de efeito estufa para atmosfera, principalmente do CO₂. Contudo, a permanência de COS está intimamente ligada ao manejo do solo, pois, quanto mais o solo é revolvido pelo cultivo mecanizado, menor o tempo de residência do COS. Segundo Resck et al. (2008), o preparo do solo usando arados quebra os agregados, expondo o substrato orgânico à decomposição microbiana, e as taxas de emissão de CO₂ para a atmosfera aumentam.

Geralmente, os sistemas de cultivo convencional, com aração e gradagem, promovem perdas de COS (DON; SCHUMACHER; FREIBAUER, 2011; VACCARI et al., 2012). Segundo Siqueira, Soares e Silva (2008), as perdas de COS estão relacionadas com baixos aportes de resíduos, maior decomposição, erosão de camadas superficiais do solo e pela exploração agrícola inadequada, promovendo degradação da estrutura do solo e redução na atividade microbiana. Araujo et al. (2014) observaram uma diminuição de cerca de 28% de COS sob cultivo de milho, feijão e mandioca quando comparado com a mata nativa na região Agreste de Pernambuco. Leite et al. (2009) verificaram ou perdas de COS em até 50%, em áreas sob cultivo convencional em um Latossolo Vermelho-Amarelo ácrico típico, no município de Campo Verde (MT). Estes resultados mostram a influência negativa da ação antrópica, causando perdas de matéria orgânica do solo. Cardoso et al. (2010) demonstraram que com a conversão de floresta nativa em pastagem cultivada, e na mudança de pastagem nativa para pastejo contínuo, houve redução significativa nos estoques de COS, nas profundidades de 0-40 cm em ecossistemas naturais do Pantanal. A perda ou ganho do COS depende do tipo, quantidade e qualidade do resíduo orgânico depositado no solo, da rotação de culturas adotada, manejo adequado do solo e do tempo de uso (MENGEL, 1996; ASSIS et al., 2006; PAVINATO; MERLIN; ROSOLEM, 2009). Ainda, a retenção do COS depende das condições climáticas e propriedades do solo, uma vez que baixas temperaturas, alta

umidade, textura argilosa e presença de óxidos de Fe causam maiores teores de COS (ZINN et al., 2007; SANTOS, 2007).

No geral, o manejo dos solos promove um desequilíbrio físico, químico, biológico dos solos em comparação à vegetação nativa, e quando o manejo é inadequado, pode-se observar também perda dos nutrientes presentes no solo. Por outro lado, o manejo conservacionista do solo tem ajudado bastante para a manutenção e disponibilidade de nutrientes. As perdas de COS causadas pelas ações antrópicas podem ser minimizadas por um maior aporte do material vegetal no solo, embora a eficiência no sequestro do COS esteja intimamente ligada ao sistema de cultivo (YAN et al., 2013). O plantio direto é uma prática que, por prescindir de cultivos anuais, permite maior agregação ao longo do tempo, enquanto que o cultivo convencional tende a destruir o processo de agregação anualmente (GREEN et al., 2007), resultando em perdas maiores de COS.

2.2 Solos anaeróbios

São solos em que a saturação dos poros por água impede a oxigenação, causando alteração eletroquímica. Quando há uma lâmina de água, a região superficial da lâmina em contato direto com o ar é oxigenada, mas a difusão gasosa ao solo é dificultada. Rosso (2007) relatou em seus estudos que cerca de 1 cm de espessura de água na região superficial é oxidada, e, abaixo desta, até cerca de 6 cm a 15 cm de profundidade, forma-se uma camada reduzida. Na região do subsolo, forma-se uma camada oxidada na região das raízes do arroz, que vão liberando o oxigênio transportado da parte aérea até as raízes para sua respiração. De acordo com Silva, Sousa e Pocojeski (2008) e Schmidt et al. (2013), o arroz facilmente se adapta a ambientes anaeróbicos devido à presença de aerênquima, estruturas que propiciam o transporte do oxigênio gasoso da parte aérea até as raízes, durante a atividade metabólica. A presença permanente ou periódica de lâmina de água, artificial ou natural, diminui a circulação de oxigênio dentro de micro- e macroporos do solo, promovendo um ambiente anaeróbico. A mudança do ambiente atribui ao solo novas propriedades, que são

importantes para o cultivo de arroz inundado. Segundo Sanchez (1976), a inundação completa do solo promove a rápida saída do oxigênio dos espaços porosos, mudando completamente a dinâmica química nestes solos. A decomposição parcial do COS em solo inundado sob cultivo do arroz faz com que os ácidos orgânicos de cadeias curtas (fórmico, acético, butírico e propiônico), acumulem até níveis tóxicos para a cultura do arroz (BOHNEN, et al., 2005; SILVA; SOUSA; POCOJESKI, 2008; BEUTLER et al., 2012).

Solos inundados apresentam desvantagens como: desestabilização da estrutura, alteração do equilíbrio químico e diminuição do número de espécies decompositoras (RHODEN et al., 2006; MAGALHÃES e GOMES, 2013). Em solos inundados, o equilíbrio de elementos, compostos e o metabolismo microbiano são alterados, resultando em novas condições físicas, químicas e biológicas que promovem um equilíbrio muito diferente daqueles de antes da inundação. Em solos de várzea cultivados com arroz inundado, a inundação do solo afetaria a sua estrutura, promovendo agregação transitória entre o período drenado e o inundado. Dessa forma, a proteção física do COS dentro de agregados seria um mecanismo pouco eficiente na sua estabilização (ROSA et al., 2011). Ainda, as condições anaeróbicas afetam as relações entre o COS e aporte de resíduos vegetais, observando-se uma proporcionalidade ainda maior entre a taxa fotossintética líquida da vegetação e o teor de COS. Isto ocorre porque o processo da decomposição do COS em áreas inundadas é muito lento, quando comparado com solos aerados, pois a insuficiência de oxigênio inibe a atividade dos microrganismos não adaptados, retardando a velocidade da decomposição do COS (SANCHEZ, 1976). As taxas nas reações de decomposição são baixas e há formação de compostos intermediários, alterando a dinâmica da MOS (PONNAMPERUMA, 1972; CAMARGO et al., 1993).

A inundação do solo é uma prática com influência dramática na disponibilidade de nutrientes. Os solos de várzeas apresentam maior ou menor fertilidade, dependendo da composição dos sedimentos e nutrientes aportados pelas águas dos rios, considerados como fontes de nutrientes para as plantas (LOPES et al., 2006; SANTOS e SALCEDO, 2010). Para Abreu e Lopes (1987), solos de várzea, geralmente, apresentam alto potencial de fertilidade

natural, razão pela qual advertem para o uso racional de corretivos e boas práticas de manejo, para preservar esta fertilidade. De acordo com Sanchez (1976), em água a taxa de difusão de oxigênio é de cerca de 10.000 vezes mais lenta do que no ar. O grau de fertilidade do solo na várzea é influenciado pelo material de origem dos solos da área fonte de sedimentos, pela qualidade de material orgânico depositado (ABREU; FERNANDES; RUIVO, 2007) e pelas classes texturais e de uso da terra (SANTOS e SALCEDO, 2010). A fertilidade de alguns solos inundados é promovida pela decomposição retardada, elevada deposição de resíduos de plantas e de material carbonizado (HANKE et al., 2014). Solos de classes texturais finas (argilosas e francos) podem apresentar maiores teores de CO_3 , Ca^{+2} , Mg^{+2} e soma de bases (SANTOS e SALCEDO, 2010). Contudo, mais importante para a fertilidade do que os aportes de sedimentos, uma das propriedades fundamentais dos solos inundados é a predominância de baixos potenciais de oxigenação, que modificam fundamentalmente a valência e/ou solubilidade de nutrientes, por meio do seu uso como aceptores finais de elétrons na respiração heterotrófica. Segundo Abreu et al. (2009), valores elevados ($>1,06$ V) de Eh aparecem em solos oxidantes, sendo que valores baixos para solos redutores (Tabela 1), portanto, reações químicas de oxirredução são afetadas pelo potencial de elétrons do sistema, o que determina a tendência do sistema em doar ou receber elétrons, sendo considerado o parâmetro físico-químico mais importante em solos inundados (PONNAMPERUMA, 1972).

Segundo Camargo et al. (2001), em solos inundados, a decomposição da MOS pode resultar na formação, em vez de CO_2 , de ácidos orgânicos, o fórmico, acético, propiônico, butírico, fumárico, succínico e málico. De acordo com Silva, Sousa e Pcojeski. (2008), o ácido orgânico produzido em maior concentração é o acético (60%), sendo encontrados valores menores de outros ácidos, destacando-se os de longa cadeia. A anaerobiose é uma das condições necessárias para a atividade de bactérias metanogênicas, e é alcançada após a redução da maioria dos íons minerais, quando as bactérias passam a usar o C como receptor de elétrons, causando a produção de CH_4 (SILVA et al., 2011). Segundo Lai (2009), a decomposição da matéria orgânica de solo por bactérias

metanogênicas em solo sob cultivo de arroz inundado tende a produzir metano (CH_4) como produto final. Os campos de arroz no mundo chegam a produzir cerca de 25 a 50 Tg/ano de metano para atmosfera (CONEN; SMITH; YAGI, 2010). Entretanto solos inundados sob cultivo do arroz com uma inadequada fertilização podem emitir 89% de CH_4 para atmosfera (LINQUIST et al., 2012). Nos estudos feitos por Silva et al. (2011), solos de várzea sob cultivo de arroz inundado no Rio Grande de Sul chegam a emitir cerca de 18% do C na forma de CH_4 . O metano é um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o CO_2 , razão pela qual é classificado como o segundo gás mais importante no efeito estufa antrópico (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC, 2013). A agricultura é uma grande fonte emissora de CH_4 , contribuindo com cerca de 55% das emissões (IPCC, 2007; SMITH et al., 2007). Segundo o Ministério de Ciência e Tecnologia-MCT, (2009), o arroz inundado contribui com 1,4% do efluxo total no Brasil. Segundo IPCC (2007), o padrão de emissão de metano em lavouras de arroz inundado é de $7,08 \text{ mg m}^{-2}\text{h}^{-1}$, ou seja, $1,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Lima et al. (2003) afirmaram que, em campos experimentais do Estado de São Paulo, foi determinada uma emissão de CH_4 de $0,67 \text{ kg ha}^{-1}\text{dia}^{-1}$, enquanto um fator de $3,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ foi determinado em lavouras de arroz inundado no Rio Grande do Sul (Costa, 2005). A produção dos ácidos orgânicos depende da quantidade do material orgânico depositado e da razão C:N, isto é, compostos com razão C:N maior (ricos em lignina) tendem a produzir menos em relação aos compostos com menor razão C:N (leguminosas, compostos ricos em proteínas, etc.).

O potencial redox (Eh) indica a disponibilidade de aceptores finais de elétrons em reações bioquímicas, e no início da inundação apresenta valores altos (300 e 500 mV), assemelhando-se aos solos aeróbicos (400 e 700 mV). Depois da inundação, o oxigênio é rapidamente consumido pela atividade microbiana heterotrófica, e ocorre uma diminuição no Eh (Sousa; Vahl; Otero, 2009), que, com o passar do tempo, vai se estabilizando, até o valor de 150 a 250 mV (SOUSA, 2001). O baixo potencial de oxirredução em solos anaeróbios altera as propriedades químicas, biológicas, mineralógicas, a solubilidade e forma dos elementos N, Fe, Mn, S e C (PONNAMPERUMA, 1972). Ocorrem

em solos inundados reações que reduzem a indisponibilidade do nitrato (NO_3^-) e nitrogênio gasoso (N_2), processo que ocorre entre 400 a 300 mV, ocorrendo nestas condições a denitrificação, e o nitrogênio se volatiliza com facilidade, promovendo deficiências deste nutriente para as plantas (Tabela 1). Pode também ocorrer excesso de Fe, Mn e S disponíveis e deficiência de Cu, Zn, Mo e B, pelo aumento do pH, influenciando negativamente o desenvolvimento das culturas. Para o fósforo, que se encontra fortemente ligado a compostos de Fe, verifica-se geralmente o aumento na sua disponibilidade com a inundação, em razão, principalmente, da redução dos óxidos de ferro. Os macronutrientes K, Ca e Mg também aumentam a sua disponibilidade na inundação pela troca pelo Fe^{2+} , Mn^{2+} e NH_4^+ (PONNAMPERUMA, 1977, citado por ABREU, FERNANDES e RUIVO, 2007). As bases trocáveis (K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) não apresentam variações no seu estado de oxidação, mas também podem ser afetadas pelas condições redutoras dos solos inundados e deslocados das micelas pelos íons Fe^{2+} e Mn^{2+} na solução de solo. Assim, podem ocorrer grandes perdas por lixiviação em solos de baixa capacidade de troca e altos teores de ferro (MACHADO, 1985). No solo, o potássio é rapidamente mineralizado, mesmo se a decomposição da matéria orgânica ocorrer lentamente, pois não faz parte de nenhuma molécula orgânica. Porém, uma vez em solos inundados a tendência do pH é aumentar, atingindo valores de 6,7 a 7,2, e assume-se que as cargas negativas variáveis aumentam e conseqüentemente maior será a adsorção do potássio. O pH em solos ácidos e inundados aumenta para valores próximos a neutralidade, devido à redução de nitratos, óxidos de ferro e manganês, que emitem O^{2-} e OH^- e consome os prótons da solução do solo, liberando água como produto da reação (tabela 1). Conforme Sanchez (1976), na inundação, o pH de um solo básico diminui até chegar a valores próximos à neutralidade. O enxofre (S) no solo pode tomar estados de oxidação que variam de +6 a -2 dependendo das condições: em solos com pH baixo, verifica-se uma diminuição dos teores de sulfato 2 meses (CARMONA et al., 2008) depois da inundação, o que em solos com pH elevado ou neutros ocorre após seis meses. A redução do sulfato a sulfitos e sulfetos ocorre a potenciais em torno de -300 mV, e este pode reagir com prótons do solo e formar H_2S , ou reagir com metais e formar

precipitados como FeS, ZnS e CuS. Nestas condições, observam-se deficiências do Zn, Cu, Fe e excesso de H₂S, que chega a níveis tóxicos para a cultura do arroz (SOUSA; VAHL; OTERO, 2009).

Tabela 1 Potenciais-padrão de meias-reações de redução no solo, a partir da aceitação de elétrons oriundos da decomposição orgânica. Fonte: (Mc Bride, 1994)

Composto	Reação	Ehe ^o (V)
Óxido de manganês	$\frac{1}{2} \text{MnO}_{2(s)} + 2\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \frac{1}{2} \text{Mn}^{2+} + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	1,23
Oxigênio	$\frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g}) + \text{H}^+ + \text{e}^- = \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	1,299
Hidróxido de Ferro	$\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + 3\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$	1,057
Nitrato	$\frac{1}{2} \text{NO}_3^- + \text{H}^+ + \text{e}^- = \frac{1}{2} \text{NO}_2^- + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	0,834
Ferro	$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$	0,711
Oxigênio	$\frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g}) + \text{H}^+ + \text{e}^- = \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}_2$	0,682
Sulfato	$\frac{1}{8} \text{SO}_4^{2-} + \frac{5}{4} \text{H}^+ + \text{e}^- = \frac{1}{8} \text{H}_2\text{S} + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	0,303
Nitrogênio	$\frac{1}{6} \text{N}_2(\text{g}) + \frac{4}{3} \text{H}^+ + \text{e}^- = \frac{1}{2} \text{NH}_4^+$	0,274
Carbono	$\frac{1}{8} \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}^+ + \text{e}^- = \frac{1}{8} \text{CH}_4(\text{g}) + \frac{1}{4} \text{H}_2\text{O}$	0,169

A prática da inundação do solo para o cultivo do arroz é considerada vantajosa, devido ao aumento na disponibilidade de nutrientes, principalmente do fósforo. De acordo com Moraes e Freire (1974), na inundação há aumento nos valores de pH (6,7 a 7,2), que contribui para o aumento na atividade de P na solução do solo, que se encontrava adsorvido a óxidos de Fe que foram reduzidos (SOUSA; CAMARGO; VAHL, 2004). O fósforo predomina no solo como ortofosfato (PO₄³⁻), forma que é afetada pela inundação somente em sua mobilidade (PONNAMPERUMA, 1972).

O Fe⁺² é um dos micronutrientes essenciais para o crescimento adequado das plantas, porém, quando em excesso na solução do solo, passa a ser nocivo para o crescimento das culturas, principalmente as pouco tolerantes ao ferro. Em solos, nem todo Fe²⁺ solúvel é absorvido pela planta, uma vez que durante a atividade metabólica da raiz, há liberação do oxigênio, que por sua vez pode precipitar o ferro na superfície da raiz como Fe³⁺, ficando indisponível para planta e gerando um mosqueado. Schmidt et al. (2013) observaram que, na inundação contínua, há decréscimo nos valores do Eh da solução do solo (270 mV para 170 mV), se estabilizando em 3 semanas em valores próximos a 150 a

120 mV (ABREU JR. et al., 2009). Isto causa uma redução de óxidos de ferro, promovendo maior disponibilidade do Fe^{2+} na solução do solo, sendo este considerado o mais importante estágio em solos inundados, por liberar fosfato, manganês e aumentar o pH (SANCHEZ, 1976; FAGERIA, 1984). Nierop, Jansen e Verstraten (2002), Kirk (2004) e Thompson et al. (2006) concluíram que a dinâmica do ferro em solos inundados é crucial, pelo fato de existir grande concentração de óxidos e hidróxidos de Fe no solo. A diminuição no teor de Fe^{2+} na solução de solo ocorre após atingir o seu pico de liberação, geralmente na terceira semana de inundação (DORAN; EBERBACH; HELLIWELL, 2006). De acordo com Sousa, Vahl e Otero (2009), solos ácidos com teores elevados de matéria orgânica e óxidos de Fe, chegam a alcançar o pico máximo de cerca de 300 mg L^{-1} de Fe^{2+} na solução do solo, após 30 dias de inundação, que diminui gradualmente, atingindo valores de 50 a 100 mg L^{-1} . Em estudos feitos por Schmidt et al. (2013), solos ácidos atingem o máximo de Fe^{2+} em 50 a 100 mg L^{-1} na solução do solo, enquanto para solos básicos atingem cerca de 30 mg L^{-1} . Ainda, a emissão do gás metano, óxidos de N, volatilização do NH_3^0 , deficiência de micronutrientes (Cu, Zn) e o excesso principalmente de Fe^{2+} e Mn^{+2} na inundação são considerados como desvantagens destes solos para o cultivo do arroz. O Mn^{+2} estabiliza o seu potencial de oxirredução, num intervalo de 200 a 300 mV (Sousa; Vahl; Otero, 2009), o que ocorre após o consumo de todo o nitrato, e com o decréscimo do potencial de oxirredução. Baixos teores de Mn na solução de solo são justificadas pela adsorção e precipitação com íons carbonatos e sulfetos, formando MnCO_3 e MnS , enquanto altas concentrações de Mn ocorrem quanto maior for o teor de COS.

O nitrogênio pode se encontrar em vários estados de oxidação e combinação química, por isso, em condições de inundação em que predominam reações de redução, ele é muito afetado (BAHN; MCNEAL; O'CONNOR, 1979). Segundo Ponnampuruma (1972), na decomposição da matéria orgânica, a mineralização de N ocorre até a forma NH_3 , após o que a nitrificação ocorre na camada oxidada (MACHADO, 1985). O nitrato normalmente tem sido a primeira substância do solo afetada pelos microrganismos anaeróbios (denitrificação), e o seu potencial de oxirredução é estabilizado num intervalo de

200 a 400 mV, verificando-se uma redução completa do nitrato em N_2O e N_2 , com fluxo para a atmosfera (SOUSA; VAHL; OTERO, 2009). Quando o material orgânico depositado no solo for herbáceo, em temperatura relativamente alta, mais rápidas serão as perdas do nitrogênio no solo. Em solos inundados, pode ocorrer também a fixação de N_2 atmosférico por algas cianofíceas. Conforme Siqueira e Franco (1988), existem cerca de 15 microrganismos, entre simbioses e de vida livre, em sítios anaeróbios ou não, capazes de fixar nitrogênio na cultura de arroz inundado.

2.3 Produção de arroz inundado no mundo

O arroz (*Oryza sativa* L.) é uma espécie hidrófila, cujo processo evolutivo tem levado sua adaptação às mais variadas condições ambientais. Devido ao seu potencial nutricional, o arroz é muito cultivado e consumido no mundo, em mais de 116 países, sendo a Ásia a principal produtora (mais de 90% da produção mundial) e consumidora deste cereal (SAKAZAKI; ALVES; LOPES, 2008).

Anualmente, em solos inundados são plantados cerca de 79 milhões de hectares de arroz em todo mundo (DOBERMANN e WITT, 2000). Segundo Lopes et al. (2006), Sakazaki, Alves e Lopes (2008) e Sousa, Vahl e Otero (2009), solos inundados são responsáveis por maior produção mundial de arroz, e em 2012, contribuíram com 75% (ANDRADE, 2010). O arroz é considerado o produto de maior importância econômica em muitos países em desenvolvimento e o aumento crescente de seu consumo impõe aos setores produtivos a busca de novas técnicas que possam aumentar sua produção. O Brasil é um dos países com maior produção de arroz sob cultivo inundado (Azambuja; Vernetti Jr.; Magalhães Jr., 2004), contribuindo anualmente com cerca 13.140.900 toneladas, ou 2,17% da produção mundial (Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO, 2006). No Brasil, existem cerca de 35 milhões de hectares de várzeas, sendo 1,3 milhão utilizados na produção de arroz inundado (STRECK et al., 2008). De acordo com Pinto, Laus e Pauletto (2004), cerca de 20% (aproximadamente 5,4 milhões hectares) dos solos no Estado do Rio

Grande do Sul são de várzea, dos quais Planossolos chegam a ocupar mais de 2,5 milhões de hectares. Assim, o cultivo do arroz inundado no Brasil abrange uma área maior nesse Estado, por ocupar cerca de 56 % das áreas de várzea (SILVA et al., 2011). Embora o Rio Grande do Sul seja o maior produtor brasileiro de arroz em sistema de cultivo inundado (65% da produção nacional), e represente pouco mais de 81% do arroz colhido no Brasil (Santos et al., 2013), outros estados também produzem quantidades significativas em menor área. O cultivo do arroz em países subdesenvolvidos contribui significativamente no fornecimento de nutrientes importantes na dieta alimentar, pelo seu valor nutricional, mas também por seu crescimento em condições de sequeiro e principalmente inundado. Segundo Walter, Marchezan e Ávila (2008), o arroz chega a fornecer em média 715 kcal/dia, sendo que 27% são de carboidratos, 20% das proteínas e 3% de lipídios, o que mostra que o arroz é um alimento bem balanceado nutricionalmente. De acordo com International Rice Research Institute (KIRK, 2004), cerca de 157 M ha são usados para o cultivo do arroz em todo mundo, sendo o sistema de cultivo inundado o principal, ocupando 57% desse total.

2.4 Justificativa, objetivo e hipótese

Quando os solos são submetidos a inundações ocorrem condições anaeróbicas que promovem mudanças nos processos bioquímicos, que influenciam fortemente a dinâmica do COS, favorecendo seu acúmulo. Porém, há falta de informação sobre teores e estoques de COS nos solos sob plantio do arroz inundado no Brasil. O objetivo da presente pesquisa foi de estudar a retenção do COS em um Gleissolo sob cultivo de arroz inundado em Lambari, MG, em comparação a cultivo de feijão e mata nativa. A hipótese testada foi que o cultivo de arroz inundado promove o sequestro de COS em relação à vegetação nativa ou outros usos, em um Gleissolo do sul de Minas Gerais.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de amostragem

O estudo foi feito nas cercanias e na Fazenda Experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) localizada no município de Lambari, a cerca de 130 km ao sul da cidade de Lavras. A EPAMIG em Lambari tem realizado experimentos de longo prazo sobre o cultivo e melhoramento do arroz desde 1985. As áreas de plantio de arroz são inundadas artificialmente durante 4 a 5 meses por ano, entre os meses de Outubro (plantio) a Abril (colheita). A Figura 1 ilustra a área amostral, nas coordenadas geográficas 21°56'45.30''S, 45°15'58.52''O e altitude de 879 m, as margens da rodovia BR 460.

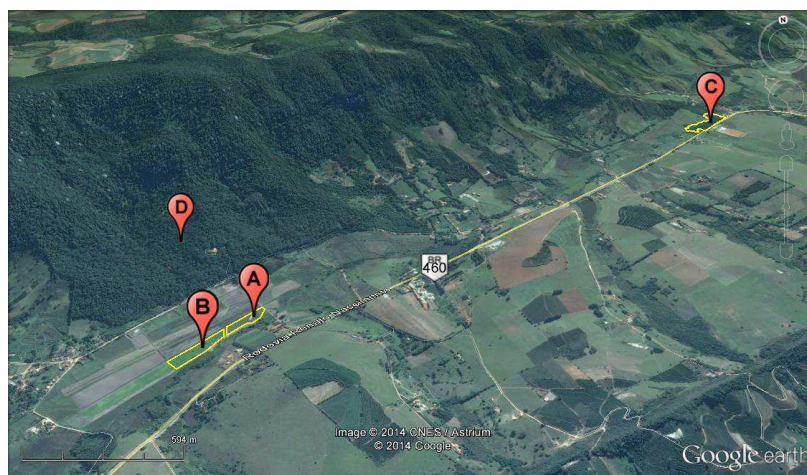


Figura 1 Imagem aérea das áreas amostrais sob: (A) arroz, (B) feijão (ambos sobre Gleissolo drenado), (C) Mata ripária sobre Gleissolo, (D) Mata do parque de Nova Baden (Argissolo)

Na área do plantio de arroz, situada na planície de inundação às margens do rio Itaci, o relevo é plano (declive <2%), com predominância de Gleissolo, com mica aparente a olho nu na fração areia. Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa, 2006), os Gleissolos apresentam um horizonte

glei, que, por ser alagável, pode resultar em acúmulo de matéria orgânica do solo e promover redução de compostos férricos, num meio permanente ou periodicamente inundado (hidromórfico). A área experimental é drenada artificialmente por canal aberto (Figura 2A), o qual é também utilizado como fonte de água para a inundação das áreas sob arroz (Figura 2B).

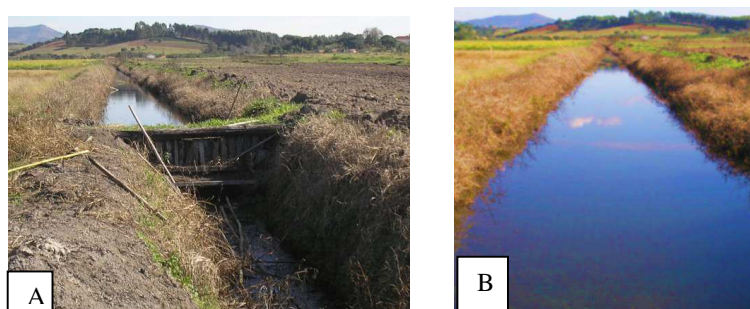


Figura 2 (A) Canal de drenagem artificial e (B) água para irrigação das áreas sob arroz inundado.

A figura 3 mostra alguns aspectos da área amostral. Para o cultivo do arroz, faz-se a calagem a cada 3-4 anos e se aplicam 500 kg/ha de adubo formulado 8-28-16 (NPK) a lançar no sulco e mais 200 kg/ha $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ em cobertura. O plantio de arroz é feito com espaçamento entre 20 a 30 cm entrelinhas e entre plantas. Depois da inundação e colheita, faz-se aração uma vez a cada dois anos, com gradagem até 20 cm de profundidade, sempre que necessário. Antes do pré-plantio, usa-se a enxada rotativa durante a inundação (*puddling*), prática comum em plantio de arroz e conhecida por seu grande impacto de destruição da estrutura do solo.

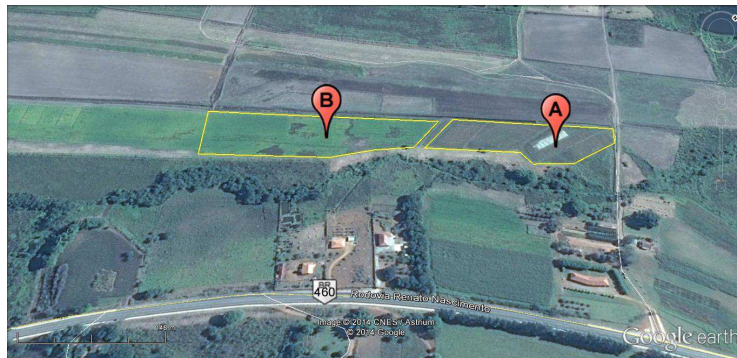


Figura 3 Vista da Fazenda da Epamig e áreas de plantio do arroz (A) e feijão (B)

Para o presente estudo, foram coletadas amostras de solo em três áreas próximas, previamente selecionadas para fins de comparação: na mesma planície de inundação, uma área de sequeiro sob cultivo de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivado na área drenada, mas não inundado, e outra sob mata nativa secundária, sem qualquer drenagem artificial. Em uma porção de terço inferior de encosta, foi amostrada uma mata nativa sobre um Argissolo (Figura, 4). Amostras deformadas e indeformadas foram coletadas nas camadas de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm e 30-40 cm, em três repetições, das paredes das trincheiras. As amostras deformadas foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras de 8 e 2 mm de diâmetro, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA).

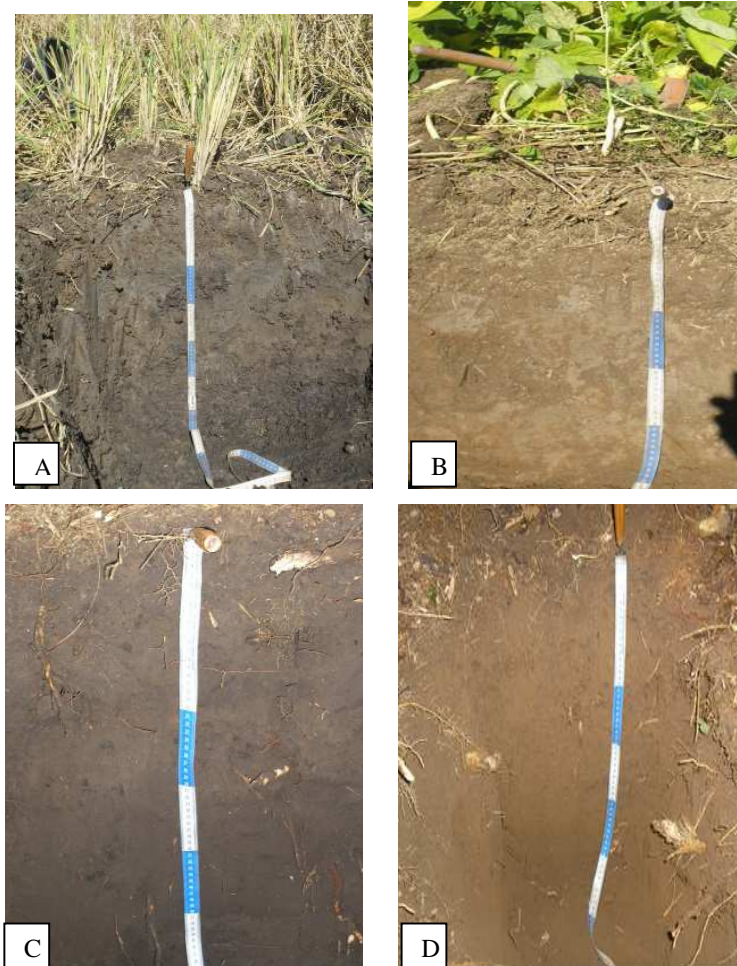


Figura 4 Trincheiras abertas para coleta de amostras do solo nas áreas de: arroz (A), feijão (B), mata nativa (C) e mata nativa do parque (D). Notar a diferença nas cores dos perfis, devido à altura do lençol freático, de 50 e 90 cm em A e C, respectivamente

3.2 Análises do solo

3.2.1 Estabilidade de agregados em água

Foram passados torrões de solo (previamente secos ao ar) em malhas sobrepostas de 8 e 2 mm de ϕ , sendo coletadas as frações de diâmetro de 8 - 2 mm por peneiramento seco. Para a análise de estabilidade de agregados em água,

usou-se a técnica de peneiramento úmido, que consistiu em pesar 20 g de agregados de 8-2 mm de ϕ , que foram colocados no topo de um jogo de peneiras (2,0; 1,0; 0,5; 0,25; e 0,105 mm), configuradas em um dispositivo de oscilação vertical (25 oscilações/minuto) dentro de um reservatório de água (Figura 5A). As amostras retidas em cada peneira foram transferidas para recipientes metálicos e secas na estufa a 105° C, durante 48h (Figura 5B), e pesadas, para permitir o cálculo do Diâmetro Médio Ponderado (DMP) e Geométrico (DMG) dos agregados, segundo Nimmo e Perkins (2002).

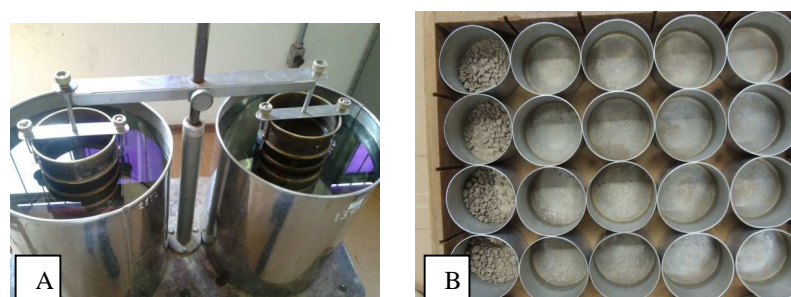


Figura 5 (A) Jogo de peneiras configuradas em um dispositivo de oscilação vertical e (B) agregados retidos em cada peneira e secas na estufa a 105° C, por 48 h

3.2.2 Análise Granulométrica

A análise da composição granulométrica (teores de areia, silte e argila) foi efetuada pelo método da pipeta após dispersão em NaOH 0,1 N. Em resumo, 20 g de TSFA foram colocadas em um recipiente com tampa de 250 ml, adicionando-se 10 ml da solução de NaOH 0,1 N e 100 ml de água, agitando-se lentamente por 16 horas num agitador horizontal Wagner TE-160-E24 (Figura 6A), Embrapa (1997). A suspensão foi passada em uma peneira de 20 cm de diâmetro e malha de 0,053 mm, que coletou a porção areia, que foi lavada continuamente até completar o volume da proveta de sedimentação de 0,5 litros com a suspensão, que passou pela peneira (silte + argila). Em seguida, determinou-se a temperatura da suspensão (que permitiu determinar o tempo de sedimentação da argila) e procedeu-se a agitação da suspensão com bastão de borracha por 1 min. Deixou-se a suspensão em repouso durante 3 h: 38 min, após

o que foi introduzida uma pipeta a 10 cm de profundidade, recolhendo-se, por sifonamento, uma alíquota de 10 ml (Figura 6B). Essa alíquota foi passada para um béquer de 10 mL e secada em estufa a 105 °C, até a evaporação completa da água, sendo depois pesado o material precipitado (argila, figura 6C). O material retido na peneira (areia) foi recolhido em latas e colocado na estufa a 105 ° C, para a secagem e posterior pesagem. O teor do silte foi determinado por diferença entre teores de areia e argila. Segundo Embrapa (1997), o teor de argila e silte pode ser determinado usando-se a seguinte fórmula: teor de silte = 1.000 - [argila (g) + areia grossa (g)].



Figura 6 (A) Agitador horizontal; e (B) coleta de alíquota de 10 mL de argila e C- argila precipitada no Béquer de 10 mL

3.2.3 Densidade do solo (Ds)

Foi determinada pelo método de anel volumétrico (de dimensões determinadas com paquímetro), inserido no solo com anel de Kopecky para amostragem indeformada. Foram determinados os pesos das amostras de solo, após a secagem em estufa a 105°C por 24 horas, e calculou-se a densidade pela razão da massa do solo seco (Figura 7) e o volume do anel, usando-se a seguinte expressão matemática: $D_s = m/v$, onde:

D_s = densidade de solo, m =massa de solo seco e v =volume do cilindro.



Figura 7 Amostras de solo sob arroz inundado seco na estufa para análise de densidade. Notar a estrutura maciça (sem poros aparentes)

3.2.4 Determinação do pH do solo em água

Para a determinação do pH do solo, usou-se o método potenciométrico, que consistiu em primeiro preparar a amostra do solo numa relação de 1:2,5 (v/v) de solo-água. Colocaram-se 10 cm³ de solo em um béquer de 50 mL, adicionando-se 25 mL de água destilada, com agitação usando um bastão de vidro por 30 segundos, e permanecendo em repouso durante 3h. Em seguida, efetuou-se uma nova agitação, com a finalidade de homogeneizar a mistura, e fez-se a leitura no potenciômetro, marca HANNA, modelo HI 2221 pH/ORP Meter.

3.2.5 Cálcio, Magnésio e Alumínio trocáveis (Ca, Mg e Al)

A extração de cátions acima citados consistiu em colocar 10 cm³ de TFSA em um béquer de 125 mL e adicionar 100 mL de solução extratora de KCl 1 M. Agitou-se a mistura por 5 min em agitador circular horizontal e deixou-se em repouso durante uma noite (12 h). Em seguida tirou-se uma alíquota de 1 mL e adicionou-se 10 mL de cloreto de estrôncio (SrCl₂) e procedeu-se a leitura no espectrofotômetro de absorção atômica de chama acetileno de marca Perkin Elmer A.Analyst 400 em 0,1 mL do extrato e 5 mL da

solução de óxido de lantânio (La_2O_3) 1g L^{-1} e Al^{3+} por titulação com NaOH $0,025\text{ mol L}^{-1}$.

3.2.6 Potássio disponível (K)

Extraiu-se o potássio disponível do solo com a solução de Mehlich-I e determinou-se o seu teor pelo método de fotometria de chama. A extração foi feita a partir de 100 mL da solução extratora (HCl $0,05\text{ mol L}^{-1}$ + H_2SO_4 $0,025\text{ mol L}^{-1}$). Em seguida, colocou-se 10 cm^3 de TSFA em um béquer de 50 mL e agitou-se em um agitador horizontal, por 5 minutos, e deixou-se em repouso durante 12 h. Posteriormente, retirou-se uma alíquota de 10 mL (filtrado) e procedeu-se a leitura em espectrofotômetro de chama.

3.2.7 Fósforo disponível (P)

O fósforo disponível no solo foi determinado com base no método colorimétrico com emprego do ácido ascórbico, que consistiu em tirar 10 cm^3 de TSFA e colocar em um erlenmeyer de 125 mL. Posteriormente, adicionou-se 100 mL de solução extratora de Mehlich-I (HCl $0,05\text{ mol L}^{-1}$ + H_2SO_4 $0,025\text{ mol L}^{-1}$) e agitou-se por 5 minutos em um agitador circular horizontal, em seguida, deixou-se em repouso por 12 h. Após o repouso, tirou-se uma alíquota de 5 mL do extrato e foram adicionadas 10 mL de solução diluída de molibdato de amônio e uma pitada de ácido ascórbico (reduzidor), agitou-se novamente a amostra por 1 minuto e deixou-se em repouso durante 30 minutos, para desenvolvimento de cor. Por último, fez-se a leitura da densidade ótica no fotocolorímetro, a partir do filtro vermelho de comprimento de onda 660 nm.

3.2.8 Micronutrientes (Fe, Zn, Mn e Cu) e S

A extração de micronutrientes foi feita pelo método de Mehlich-I modificado, com determinação por espectrofotometria de absorção atômica. O método consistiu em colocar 10 cm^3 de TSFA em erlenmeyer de 125 mL e

adicionar 50 ml de solução extratora de Mehlich-I. Posteriormente, agitou-se a amostra mecanicamente por 5 minutos e efetuou-se a filtração imediata da suspensão. Por último, tirou-se uma alíquota de 10 mL do filtrado, e fez-se a leitura no espectrofotômetro de absorção atômica.

3.2.9 Determinação da acidez potencial (H + Al)

A acidez potencial do solo foi feita pelo método do acetato de cálcio tamponado a pH 7, que consistiu em introduzir 10 cm³ de TSFA em um erlenmeyer de 50 mL e adicionar 25 mL de solução de CaCl₂ 0,01M e 5 mL de solução de SMP (Schoemaker; McLean; Pratt) (RAIJ et al., 1987; CIPRANDI, 1993). Agitou-se a amostra por 15 minutos em um agitador circular horizontal regulado a 220 rpm, e deixou-se em repouso durante 1h. Em seguida, sem agitar novamente a amostra, fez-se a leitura pelo método potenciométrico num intervalo de até 8h.

3.2.10 Determinação de teores de C total

Para a análise do carbono total, foi utilizado o método de combustão a seco em analisador de carbono de marca Elementar, modelo Vario TOC Cube. Primeiramente, as amostras de TFSA foram maceradas em almofariz de ágata e passadas em peneiras com malha de 0,250 mm (fig.8 A) e secas em estufa a 65 °C, durante 48 h. Foram pesados 0,2 mg de solo em balança analítica da marca METTLER TOLEDO, “Classic”, com 0,00001 g de precisão, posteriormente e seladas em cápsulas de estanho. As amostras foram introduzidas no aparelho (Figura 8B) e incineradas a temperatura de cerca de 950 °C por 5 min em um tubo de combustão de quartzo, utilizando como carreador o gás O₂, com 99,998 % de pureza (Carmo e Silva, 2012). Neste ambiente, todo o carbono foi oxidado e transformado em CO₂, e registrado por um detector de infravermelho do tipo NDIR. O teor de carbono na amostra sólida foi calculado em função do C-CO₂ evoluído e da massa de amostra utilizada inicialmente na combustão. O estoque de COS foi obtido a partir do somatório dos estoques de cada camada de solo,

estimados pelo produto da densidade, teor de COS e espessura da camada de solo amostrada, conforme fórmula disponível em Zinn; Lal; Resck, 2005.

$$\text{COS} = C \times \text{DS} \times v$$

Onde: COS= carbono orgânico de solo (Mg/ha); C= teor de carbono de solo (Mg/Mg); DS= densidade de solo (Mg/m^3) e v= volume do solo (m^3/ha)

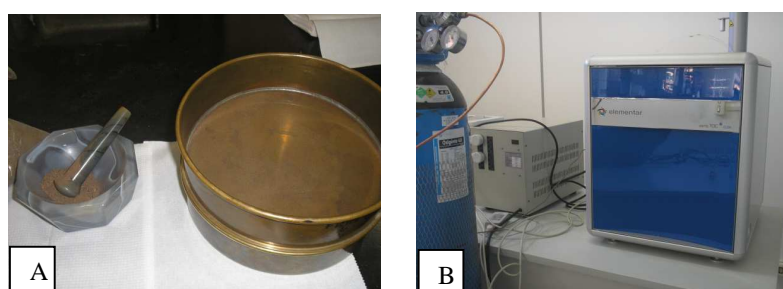


Figura 8 Almofariz de ágata e peneira (A) e aparelho TOC CUBE (B)

3.2.11 Determinação de nitrogênio total em solo

Foi usado o método de Kjeldahl por destilação a vapor, descrito por Embrapa (1997). O método consistiu em colocar 0,1 g de amostra passada em peneira de 100 mesh (equivalente a 0,149 mm) no tubo digestor, ao qual foi adicionado 1,1 g da mistura de digestão (100 g K_2SO_4 + 10 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ + 1g Se). Em seguida, adicionaram-se 3 mL de ácido sulfúrico concentrado (com a bureta de 50 mL), e os tubos foram colocados em bloco digestor para digestão por 3h (Figura 9A), onde elevou-se a temperatura gradualmente até 100 °C durante 1h, após 1h elevou-se novamente a temperatura até 350 °C, durante as últimas 2 h, até o clareamento da mistura. Após ter completado a digestão, retiraram-se os tubos digestores contendo amostras do solo, resfriou-se gradualmente e adicionaram-se 20 mL de água, acompanhada por uma suave agitação. Procedeu-se a destilação no aparelho destilador de nitrogênio, modelo SL-74 (Figura 9B), onde introduziu-se no funil do destilador 10 mL de NaOH 13N e foi colocado na parte inferior do condensador um erlenmeyer de 125 mL, contendo 10 mL de ácido bórico (usou-se bico de papagaio). Abriu-se a torneira

lentamente e adicionou-se o NaOH no tubo de digestão e fechou-se a torneira. Iniciou-se a coleta do destilado até 50 mL, e titulou-se com uma solução de HCl $0,07143 \text{ mol L}^{-1}$ com bureta digital (Figura 9C).

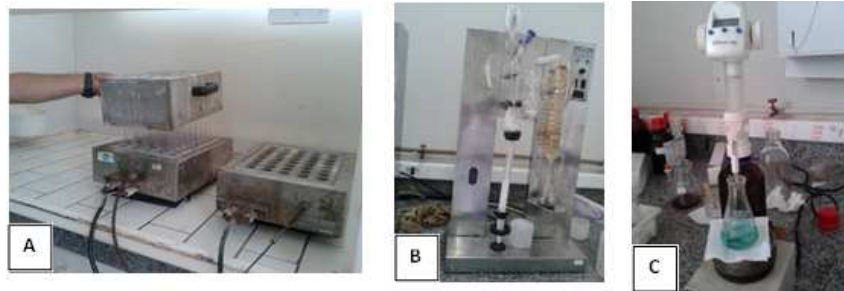


Figura 9 (A) Bloco digestor; (B) destilador de nitrogênio e (C) bureta automática

3.3 Delineamento Experimental e Análise estatística

O delineamento usado foi inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (usos da terra), em três repetições. A análise de variância (ANOVA) e testes de médias foram feitos por profundidade, para não incluir esta como fonte de variação, diminuindo o poder dos testes. Foi utilizado o teste de Tukey a 5% de significância, com o programa Sisvar (FERREIRA, 2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do solo

Para o estudo, usaram-se dois solos identificados como Gleissolo Háptico e Argissolo Vermelho-Amarelo (Embrapa, 2006), sendo que só o primeiro apresentou mais de um uso de terra. A classe textural para cada tratamento e profundidade variou de argilosa, franco-argilosa a franca (Tabela 2).

Tabela 2 Teores médios de areia, argila, silte e classe textural do solos sob diferentes tratamentos e profundidades

Uso do solo	Areia	Argila	Silte	Classe textural
	-----%-----			
	-----0-5 cm-----			
Mata/Argissolo	39,0 A	47,6 AB	13,4 C	Argilosa
Mata/Gleissolo	19,5 B	57,4 A	23,1BC	Argilosa
Arroz/Gleissolo	24,0 AB	38,1 BC	38,0 A	Franco-Argilosa
Feijão/Gleissolo	39,8 A	27,8 C	32,4 AB	Franco-Argilosa
	-----5-10 cm-----			
Mata/Argissolo	40,0 A	46,9 AB	13,1 B	Argilosa
Mata/Gleissolo	21,6 C	56,9 A	21,5 B	Argilosa
Arroz/Gleissolo	23,9 AB	37,9 BC	38,2 A	Franco-Argilosa
Feijão/Gleissolo	39,0 AB	27,7 C	33,3 A	Franco
	-----10-20 cm-----			
Mata/Argissolo	38,2 A	49,2 AB	12,6 C	Argilosa
Mata/Gleissolo	21,1 B	57,5 A	21,5 BC	Argilosa
Arroz/Gleissolo	24,7AB	37,7 BC	37,5 A	Franco-Argilosa
Feijão/Gleissolo	39,3 A	27,0 C	33,7 AB	Franco
	-----20-40 cm-----			
Mata/Argissolo	35,0 A	53,3 A	11,8 B	Argilosa
Mata/Gleissolo	32,4 A	48,0 A	19,6 B	Argilosa
Arroz/Gleissolo	15,6 B	43,8 A	40,5 A	Argilo-Siltosa
Feijão/Gleissolo	41,1 A	27,2 B	31,6 A	Franco

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$)

No geral, observou-se variação textural em profundidade no Gleissolo sob mata e arroz, o que é esperado devido a processos de deposição diferencial de sedimentos na planície de inundação. Embora os plantios de arroz e feijão

sejam relativamente próximos, apresentam texturas diferentes refletindo os processos deposicionais. Porém, a textura, em cada solo cultivado, é homogênea em profundidade, provavelmente devido ao cultivo mecanizado. Em comparação, a textura é relativamente homogênea nos primeiros 20 cm do Argissolo, observando-se conforme esperado um maior teor de argila a 20-40 cm. Os solos estudados apresentam um estado ainda moderado de intemperismo, com grande presença de moscovita na fração areia (Figura 10).

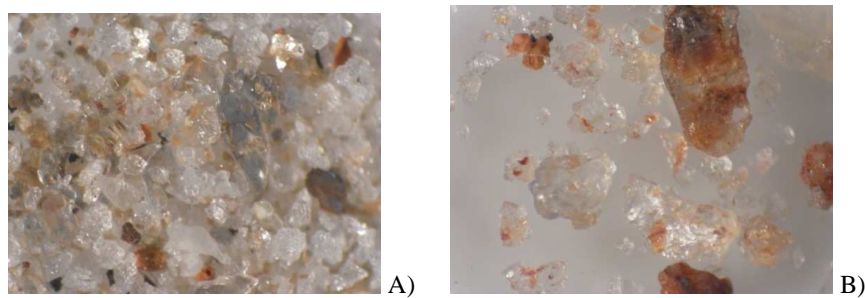


Figura 10 Fração areia da camada 20-40 cm dos solos sob vegetação nativa, após oxidação da matéria orgânica com H_2O_2 . Gleissolo (A): notar os grãos arestados de quartzo, geralmente desprovidos de revestimentos de óxidos de Fe, e presença de moscovita grosseira. No Argissolo (B): notar os grãos arestados de quartzo, alguns mostrando revestimento por óxidos de Fe, e presença de moscovita grosseira altamente impregnada por óxidos. Largura da imagem 4 mm.

Os dados da tabela 3 estão associados às médias dos indicadores de acidez em cada uso e profundidade do solo. No geral, pode-se observar que os valores de pH são baixos, principalmente na subsuperfície dos solos sob mata. Resultados com mesma tendência foram encontrados por Magalhães e Gomes (2013), em solos de várzea em Espírito Santo-AM, observando aumento do pH com a profundidade causado pela redução nos teores de Al e elevados teores de bases trocáveis.

Tabela 3 Valores médios de indicadores de acidez do solo para diferentes manejos e profundidades

Uso do solo	pH	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	M
		-----cmol _c dm ⁻³ -----		----%----
-----0-5 cm-----				
Mata/Argissolo	5,07 A	0,90 A	9,83 A	21,0 A
Mata/Gleissolo	4,97 A	1,90 A	13,5 A	56,0 A
Arroz/Gleissolo	5,23 A	0,77 A	6,81 A	20,8 A
Feijão/Gleissolo	5,37 A	0,43 A	6,08 A	10,1 A
-----5-10 cm-----				
Mata/Argissolo	4,83 AB	1,33 AB	11,7 AB	46,0 A
Mata/Gleissolo	4,53 B	1,93 A	13,8 A	68,7 A
Arroz/Gleissolo	5,33 A	0,70 AB	6,55 C	17,7 A
Feijão/Gleissolo	5,40 A	0,63 B	6,82 BC	15,6 A
-----10-20 cm-----				
Mata/Argissolo	4,70 B	1,53 AB	12,1 A	69,3 A
Mata/Gleissolo	4,80 B	1,77 A	12,0 A	81,9 A
Arroz/Gleissolo	5,40 A	0,73 BC	6,79 B	18,6 B
Feijão/Gleissolo	5,50 A	0,60 C	5,86 B	16,6 B
-----20 40 cm-----				
Mata/Argissolo	4,90 AB	1,53 AB	12,3 A	82,3 A
Mata/Gleissolo	4,83 C	1,60 AB	11,5 A	72,3 AB
Arroz/Gleissolo	5,17 AB	1,83 A	10,3 A	50,8 BC
Feijão/Gleissolo	5,43 A	0,97 C	6,79 A	33,6 C

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey (p < 0,05)

Solos inundados com elevados teor de matéria orgânica apresentam pH menor do que 6,5, o que é explicado pela acidez dissociável dos ácidos orgânicos (PONNAMPERUMA, 1972). Por outro lado, solos inundados em condições naturais tendem a perder cátions básicos pela lixiviação e absorção destes pelas espécies vegetais, com consequente acúmulo de H⁺, excretado pela microbiota e vegetação. Pode-se observar também que a acidez trocável (Al³⁺) mostra um comportamento inversamente proporcional ao pH, ou seja, a toxicidade por alumínio diminui quanto maior for o pH. Estudos conduzidos por Guimarães et al. (2013), sobre a caracterização e classificação de perfis de Gleissolos no município de Manacapuru-AM, demonstraram que, acima de pH 5,5, houve uma

diminuição do Al^{3+} trocável, para valores quase nulos. Mesma tendência foi encontrada nos estudos feitos por Fajardo, Souza e Alfaia (2009) em solos de várzeas sob diferentes sistemas de uso, ainda em Manacapuru-AM. Embora o pH seja baixo para todos os tratamentos, nos solos cultivados com arroz e feijão, tende a se aproximar do valor ideal (5,5-6,5), devido à correção por calagem, feita a cada 3-4 anos. Foram encontrados maiores valores de acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) na mata de Gleissolo, quando comparado com Gleissolos cultivados a 5-20 cm, o que é explicado pelos teores elevados de COS (Tabela 7). Embora estatisticamente não tenha havido diferença significativa da saturação por alumínio (m%) nas profundidades superficiais (0-10 cm), abaixo disto, notou-se maiores valores na mata do Gleissolo, em relação aos Gleissolos cultivados com arroz e feijão. Menores valores de saturação por alumínio no Gleissolo cultivado podem ser explicados a partir da correção da acidez e uso de fertilizantes.

Tabela 4 Valores médios de propriedades químicas do solo para diferentes tratamentos e profundidades

Uso do solo	K ---mg dm ⁻³ ---	P	Ca ²⁺ -----cmol _c dm ⁻³ -----	Mg ²⁺	SB	T	P-Rem mg L ⁻¹
-----0-5 cm-----							
Mata/Argissolo	69,3 B	3,11 B	3,30A	0,93 A	4,41A	14,2 A	11,6 A
Mata/Gleissolo	92,0 B	11,0 B	1,27A	0,63 A	2,14A	12,3 A	9,44 A
Arroz/Gleissolo	123 B	53,5 A	2,03A	0,67 A	3,02A	9,84 A	12,3 A
Feijão/Gleissolo	182 A	48,6 A	2,43A	1,00 A	3,90A	9,98 A	18,9 A
-----5-10 cm-----							
Mata/Argissolo	45,3 C	2,10 B	1,23A	0,40 A	1,75A	13,5AB	6,30 C
Mata/Gleissolo	56,7BC	6,42 B	0,60A	0,37 A	1,11A	14,9 A	4,16 C
Arroz/Gleissolo	81,3 AB	51,0 A	2,30A	0,80 A	3,31A	9,85 B	12,8 B
Feijão/Gleissolo	114 A	40,4 A	2,37A	0,80 A	3,46A	10,3 B	17,5 A
-----10-20 cm-----							
Mata/Argissolo	34,0 AB	1,9 C	0,50 B	0,2 B	0,8 B	12,9 A	4,64 B
Mata/Gleissolo	27,3 B	8,80 BC	0,10 B	0,2 B	0,4 B	12,3 A	3,12 B
Arroz/Gleissolo	60,0 AB	48,7 A	2,20A	0,8 A	3,2 A	10,0 A	12,5 A
Feijão/Gleissolo	63,3 A	27,3AB	2,10A	0,8 A	3,0 A	8,9 A	14,7 A
-----20-40 cm-----							
Mata/Argissolo	22,0 A	1,03 C	0,17 B	0,10 B	0,32 B	12,6 A	3,84 B
Mata/Gleissolo	30,0 A	8,13 AB	0,23 B	0,33AB	0,64 B	12,2 A	3,54 B
Arroz/Gleissolo	44,0 A	13,1 A	1,10A	0,57 A	1,78A	12,0 A	3,63 B
Feijão/Gleissolo	37,3 A	7,77 AB	1,23A	0,63 A	1,96A	8,76 A	9,46 A

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Em relação aos teores de K e P, foram observados valores maiores nos solos sob arroz e principalmente feijão em subsuperfície (Tabela 4), devido à adubação química usada nestas áreas (500 kg ha^{-1} de adubo formulado NPK 8-28-16). Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , e, portanto, a soma de bases (SB), não diferiram entre os tratamentos, até 10 cm de profundidade, mas foram maiores sob arroz e feijão, devido à correção da acidez (feita a cada 3-4 anos) e fertilização. Os moderados teores de K podem ser também justificados pelos minerais provenientes do material de origem (feldspato e mica), esta aparente a olho nu na fração areia (Figura 10 A e B).

Os resultados apresentados na tabela 5 mostram que os micronutrientes Mn e Cu parecem ter sido afetados principalmente pela fertilização, que condicionou o aumento nos seus teores em Gleissolos cultivados. A inundação periódica aumentou muito a disponibilidade do Fe sob arroz, principalmente nas profundidades abaixo de 5 cm, mais úmidas. Sousa, Bohnen e Meurer (2002) estudando um Planossolo em diferentes profundidades e tempos de inundação no Rio Grande de Sul, encontrou maiores valores de Fe (200 mg L^{-1}) igualmente abaixo de 5 cm. Estes valores refletem a influência da anaerobiose na redução do Fe, que aumentam sua disponibilidade na solução de solo. Segundo Sanchez (1976), Abreu et al. (2009), Schmidt et al. (2013) e Hanke et al. (2014), a anaerobiose promove a redução do estado férrico (Fe^{3+}) a ferroso (Fe^{2+}), aumentando a solubilidade e disponibilidade desse íon na solução do solo, que em certos casos chega a atingir níveis tóxicos para culturas. Embora os teores de Fe^{2+} tenham sido relativamente altos abaixo de 5 cm, não atingiram valores considerados críticos para a cultura do arroz. Segundo Fageria et al. (2011), a toxicidade de ferro em plantas de arroz, caracterizada pelo bronzeamento de folhas, aparece quando o Fe^{2+} solúvel na solução do solo atinge valores entre 300 a 500 mg kg^{-1} .

Tabela 5 Valores médios de micronutrientes e S do solo para diferentes tratamentos e profundidades

Uso do solo	Zn	Fe	Mn	Cu	S
	-----mg dm ⁻³ -----				
-----0-5 cm-----					
Mata/Argissolo	2,11 A	78,9 B	57,7 A	0,69 B	10,8 A
Mata/Gleissolo	3,27 A	172 AB	22,9 A	1,66 B	10,1 A
Arroz/Gleissolo	3,06 A	317 A	31,7 A	4,35 A	15,6 A
Feijão/Gleissolo	3,75 A	184 AB	41,2 A	3,50 A	12,6 A
-----5-10 cm-----					
Mata/Argissolo	1,06 B	69,5 C	33,5 A	0,59 B	8,64 A
Mata/Gleissolo	2,07 AB	103 C	7,40 B	1,53 B	6,00 A
Arroz/Gleissolo	2,82 A	336 A	34,2 A	4,33 A	11,9 A
Feijão/Gleissolo	3,31 A	197 B	35,6 A	3,70 A	12,4 A
-----10-20 cm-----					
Mata/Argissolo	0,84 B	69,0 C	22,4 A	0,53 B	8,23 A
Mata/Gleissolo	1,49 AB	41,6 C	0,57 B	1,29 B	6,45 A
Arroz/Gleissolo	2,57 A	352 A	36,1 A	4,42 A	13,6 A
Feijão/Gleissolo	2,37 A	189 B	26,6 A	3,70 A	10,9 A
-----20-40 cm-----					
Mata/Argissolo	0,46 A	55,6 B	11,9 BC	0,47 B	5,31 B
Mata/Gleissolo	1,31 A	41,5 B	1,31C	1,18 B	5,01 B
Arroz/Gleissolo	0,70 A	287 A	38,2 A	3,85 A	11,9 AB
Feijão/Gleissolo	0,60 A	112 B	20,9 B	3,09 A	13,4 A

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$)

Os maiores teores do ferro na camada de 20-40 cm podem ser devido à anaerobiose mais constante, causando remoção mais frequente do Fe^{2+} . Finalmente, ao comparar-se as tabelas 3, 4 e 5, nota-se que não houve diferenças significativas entre Argissolo e Gleissolo sob mata nativa, embora o último apresente menor teor de areia (Tabela 2).

4.2 Alterações na agregação e densidade do solo devido ao manejo

O cultivo do Gleissolo resultou em diferenças significativas na densidade e agregação dos solos, segundo a ANOVA (Tabela 7). Maiores valores de Ds foram observados nos Gleissolos sob arroz (1,09 a 1,04 g cm⁻³) e feijão (1,20 a 1,18 g cm⁻³) em relação à mata sobre o Gleissolo (0,73 a 0,96 g cm⁻³), mas não em comparação à mata sobre Argissolo (Tabela 7). O aumento da Ds sob cultivos de feijão (41%) e arroz (31%) é explicado pelo efeito do maquinário durante o preparo do solo para o plantio, pois usa-se o arado uma vez a cada dois anos e a grade anualmente. Nas áreas do arroz usa-se também a enxada rotativa durante a inundação, mas este cultivo mais intensivo não resultou em maior densidade do solo, em relação ao cultivo do feijoeiro. Mentges et al. (2012) mostraram resultados similares em que Gleissolos sob cultivo de arroz no município de Santa Maria (RS), com aumento da densidade na camada superficial (0-20 cm), indicando que o sistema de uso do solo contribuiu para compactação da superfície do solo.

Observou-se um crescimento nos valores de Ds ao longo da profundidade na mata sobre Gleissolo (0,73 a 0,96 g cm⁻³) e Argissolo (0,94 a 1,08 g cm⁻³) na superfície, conforme observado por Pádua, Guerra e Zinn (2015).

Tabela 6 Níveis de significância da ANOVA para as características físicas do solo

Fonte de variação	DMG	DMP	Ds
		-----0-5 cm-----	
Uso do solo	***	***	**
		-----5-10 cm-----	
Uso do solo	*	*	**
		-----10-20 cm-----	
Uso do solo	*	*	***
		-----20-40 cm-----	
Uso do solo	*	*	*

* significativo a $p < 0,05$; ** a $p < 0,01$; *** a $p < 0,001$

Os valores de Ds do solo tenderam a ser mais altos na mata sobre Argissolo, em relação à mata de Gleissolo, devido à textura mais arenosa (Tabela 2) e menor teor de COS (Tabela 9) do primeiro em relação ao segundo, o que acarreta em valores mais altos desta propriedade.

Tabela 7 Efeito dos tratamentos nas propriedades físicas do solo.

Uso do solo	DMG	DMP	Ds
	-----mm-----		g cm ⁻³
	-----0-5 cm-----		
Mata/Argissolo	4,80 AB	4,92 AB	0,94 AB
Mata/Gleissolo	4,92 A	4,97 A	0,73 B
Arroz/Gleissolo	3,79 C	4,48 C	1,07 A
Feijão/Gleissolo	4,36 B	4,72 BC	1,06 A
	-----5-10 cm-----		
Mata/Argissolo	4,73 AB	4,89 AB	0,99 AB
Mata/Gleissolo	4,88 A	4,96 A	0,81B
Arroz/Gleissolo	4,26 B	4,67 B	1,09 A
Feijão/Gleissolo	4,33 AB	4,70 AB	1,20 A
	-----10-20 cm-----		
Mata/Argissolo	4,66 AB	4,85 AB	1,06 A
Mata/Gleissolo	4,90 A	4,97 A	0,83 B
Arroz/Gleissolo	4,26 C	4,67 C	1,16 A
Feijão/Gleissolo	4,47 AB	4,77 AB	1,24 A
	-----20-40 cm-----		
Mata/Argissolo	4,56 AB	4,79 AB	1,08 AB
Mata/Gleissolo	4,79 A	4,93 A	0,96 B
Arroz/Gleissolo	3,40 B	4,18 B	1,04 AB
Feijão/Gleissolo	3,95 AB	4,54 AB	1,18 A

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Para comparar a estabilidade de agregados em água entre solos, foram calculados o Diâmetro Médio Geométrico (DMG) e Diâmetro Médio Ponderado (DMP). Observou-se que a mata sobre Gleissolo apresentou maiores valores de DMG e DMP em relação ao Gleissolo sob arroz, em todas as profundidades. O mesmo não ocorreu em relação à mata sobre Argissolo e no solo sob feijoeiro, abaixo de 5 cm de profundidade. Os menores valores sistematicamente observados para o arroz devem-se ao cultivo altamente destrutivo dos agregados com a enxada rotativa. Pode-se inclusive notar a formação de estrutura maciça no arroz (Figura 7), resultante da desagregação e redistribuição de partículas principalmente do silte, que vão se reacomodando no espaço poroso devido a seu tamanho reduzido, formando a estrutura maciça. Beutler et al. (2014) observaram igualmente no Rio Grande do Sul, em arroz inundado, valores menores de DMG na superfície do solo, mostrando alteração das propriedades físicas do solo em função do revolvimento.

4.3 Alteração no carbono orgânico do solo (COS), nitrogênio total e razão C:N

A tabela 8 mostra que, para os diferentes sistemas de uso do solo, houve variação significativa pela ANOVA, com exceção do nitrogênio e razão C:N, que mostraram-se não significativas nas profundidades de 0-5 cm e nitrogênio em 20-40 cm.

Tabela 8 Níveis de significância da ANOVA para teores de COS, N e razão C:N

Fonte de variação	COS	N	C:N
		-----0-5 cm-----	
Uso do solo	*	n.s.	n.s.
		-----5-10 cm-----	
Uso do solo	**	**	*
		-----10-20 cm-----	
Uso do solo	*	*	*
		-----20-40 cm-----	
Uso do solo	*	n.s.	**

* significativo a $p < 0,05$; ** a $p < 0,01$; *** a $p < 0,001$ e
n.s. não significativo

Em todas as profundidades, a mata sobre Gleissolo apresentou em média, maiores teores de COS e N (Tabela 9) do que os solos cultivados, o que pode ser explicado pelo cultivo e revolvimento (uso da enxada rotativa, grades e arado), oxidando a matéria orgânica pré-existente e menor aporte de resíduos orgânicos.

Tabela 9 Teores de COS, N e razão C:N sob diferentes usos e profundidades

Uso do solo	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	20-40 cm
COS (%)				
Mata/Argissolo	4,94 Ba	3,50 Bab	2,99 Bab	2,44 Bb
Mata/Gleissolo	6,32 Aa	5,63 Aab	4,98 Aab	4,13 Ab
Arroz/Gleissolo	2,55 Ca	2,50 Cab	2,30 Cab	1,83 Cb
Feijão/Gleissolo	2,41Ca	2,18 Cab	1,85 Cab	1,51 Cb
N (%)				
Mata/Argissolo	0,39 Ba	0,37 Ba	0,33 Bab	0,22 Bb
Mata/Gleissolo	0,49 Aa	0,43 Aa	0,39 Aab	0,31 Ab
Arroz/Gleissolo	0,30 Ca	0,23 Ca	0,22 Cab	0,18 Cb
Feijão/Gleissolo	0,31 Ca	0,24 Ca	0,22 Cab	0,19 Cb
Razão C:N				
Mata/Argissolo	12,6 Aa	9,46 Ba	11,2ABa	11,2ABa
Mata/Gleissolo	12,8 Aa	13,0 Aa	13,3 Aa	13,3 Aa
Arroz/Gleissolo	9,17 Aa	10,8Aa	10,3Aa	10,3Aa
Feijão/Gleissolo	8,27 Aa	9,12 Ba	8,30 Ba	8,30 Ba

Médias seguidas da mesma letra na coluna, e pela mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$)

Segundo Lopes et al. (2006) e Resck et al. (2008), o uso de arados e grades no preparo do solo destrói os agregados do solo, aumentando a aeração e expondo o substrato orgânico à decomposição microbiana, assim diminuindo o teor de COS, N e, por conseguinte, aumentando a taxa de emissão de CO₂ para a atmosfera. Vários estudos demonstraram que sistemas de uso que degradam a estrutura do solo tendem a emitir C para a atmosfera (CORAZZA et al., 1999; SEY et al., 2008; YAN et al., 2012; ZHANG et al., 2014), e os sistemas de manejo conservacionista (plantio direto, por exemplo), tendem a diminuir a perda do COS no solo (LEITE et al., 2009; ROSA et al., 2011; FUENTES et al.,

2012; O'BRIEN e JASTROW, 2013; ZHANG et al., 2014). Lopes et al. (2006), ao estudar as características químicas de um Gleissolo sob diferentes usos em Belém (Pará), observou redução de -16,7% no teor de COS sob cultivo do arroz (20 g kg^{-1}) na profundidade em que houve maior perturbação do solo (0-10 cm), em relação à floresta nativa (24 g kg^{-1}).

A mata sobre Argissolo apresentou teores menores de COS e N, em relação à mata do Gleissolo, especialmente nas camadas subsuperficiais. Isto sugere efeito da menor taxa de decomposição orgânica sob a inundação no Gleissolo, que reduz o fluxo de oxigênio e a ação microbiana (TOMÉ, 1997; ABREU et al., 2007; KÖGEL-KNABNER et al., 2010). A taxa de decomposição do substrato orgânico em ambientes anaeróbicos é mais lenta do que em solos aeróbicos, devido à baixa atividade microbiana que promove redução na velocidade e eficiência de processos bioenzimáticos (NAYAK; BABUB; ADHYA, 2007). Contudo, solos expostos a elevadas temperaturas ($> 30^\circ \text{C}$), mesmo inundados, proporcionam alta taxa de decomposição da biomassa (RESCK et al., 2008) e aração e enxada rotativa e à aeração mais frequente que a condição original.

Não houve diferença significativa no teor de COS entre a área do arroz e feijão, exceto para a camada de 10-20 cm. Tal resultado pode ser devido à matéria seca do arroz, mais estável à decomposição, em relação ao feijão, que é uma leguminosa mais rica em N na sua palhada. De fato, a razão C:N do solo sob feijão é sempre < 10 . A incorporação da palhada do arroz na operação de preparo do solo não se refletiu em maior teor de COS em relação aos solos sob feijão, provavelmente devido ao intensivo revolvimento do solo nas camadas mais superficiais. Em todos os solos, o teor de COS decresceu significativamente em profundidade, em acordo com o comportamento esperado.

No geral, ao longo da profundidade, o nitrogênio teve uma tendência na redução do seu teor para as quatro áreas avaliadas. Os dados das figuras 11, 12 e 13 representam o comportamento do COS, N e razão C:N, respectivamente, ao longo das camadas amostradas. Os maiores teores de nitrogênio observados nas matas estão associados aos maiores teores de COS (Tabela 9). É interessante

realçar que, entre os tratamentos de arroz e feijão, os teores de N foram iguais, apesar de o último fixar o nitrogênio atmosférico simbioticamente.

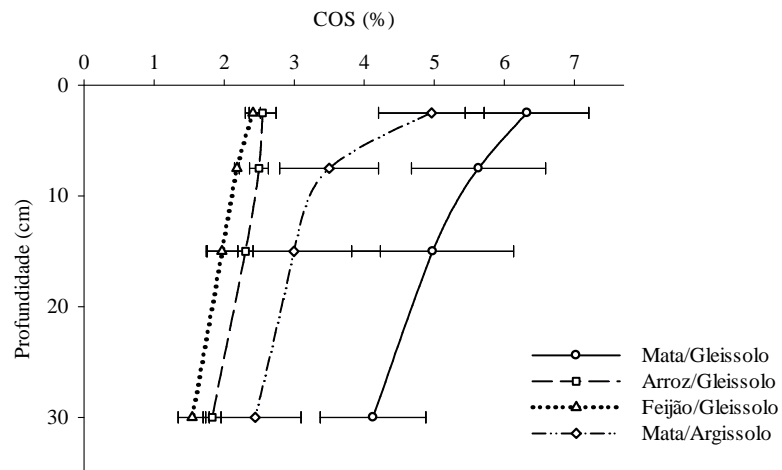


Figura 11 Teores de COS sob diferentes usos e profundidades

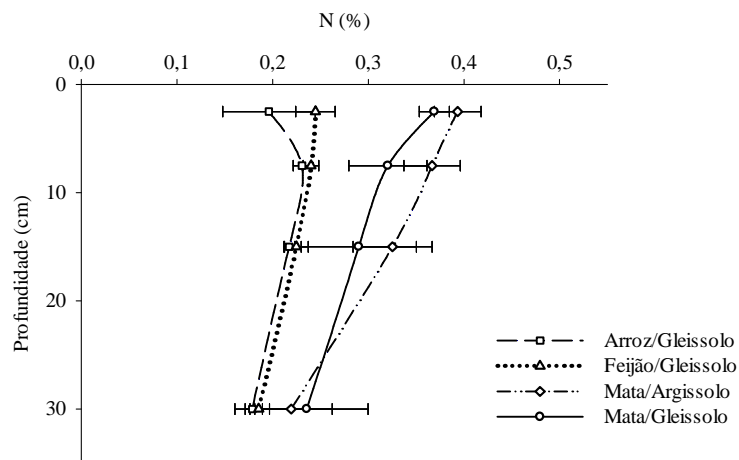


Figura 12 Teores de N sob diferentes usos e profundidades

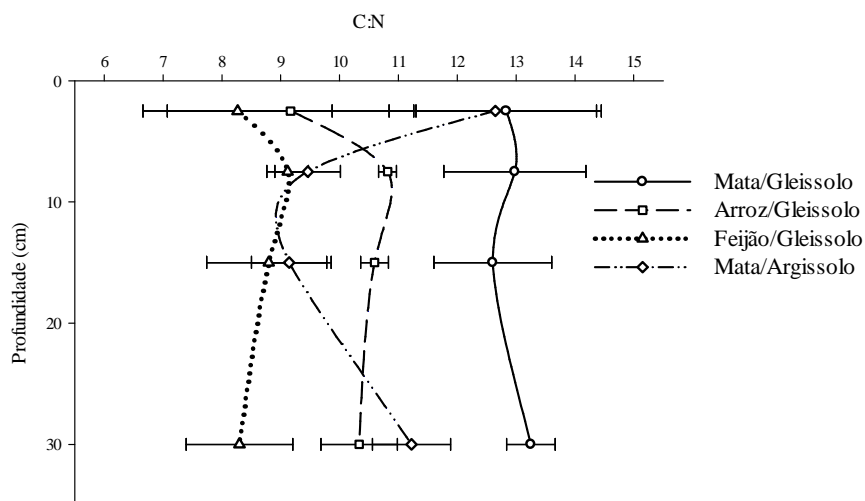


Figura 13 Razão C:N sob diferentes usos e profundidades

Menores valores de razão C:N são verificados no Gleissolo sob feijão em relação à mata e o arroz (Figura 13), uma vez que as leguminosas tem uma biomassa rica em nitrogênio, fazendo com que tenham menor C:N e mais susceptíveis a degradação. Maiores valores da razão C:N podem ser esperados sob vegetação nativa devido à contribuição de diversas espécies vegetais, que aportam mais C nestes solos, mas isto não se refletiu em C:N significativamente maior do que sob arroz (Tabela 9). Na mata sob Argissolo, razão C:N foi maior na superfície e na profundidade de 10 a 40 cm, indicando o comportamento de um solo argiloso na iluviação da argila em profundidade, que leva consigo a matéria orgânica humificada de baixa razão C:N para o subsolo.

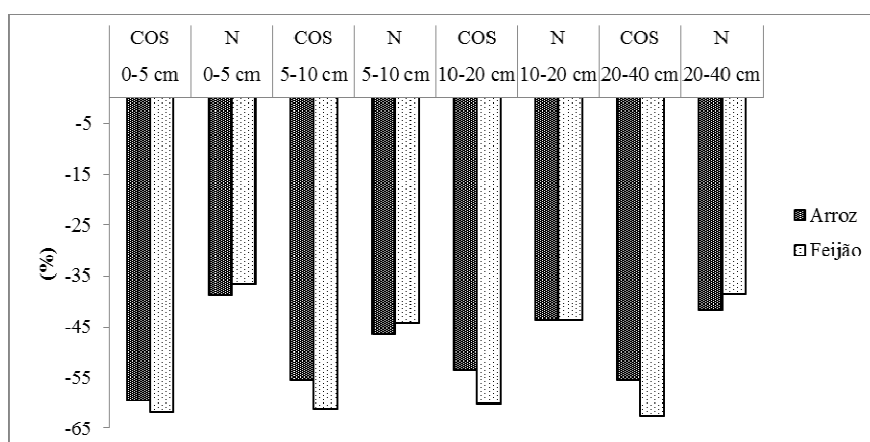


Figura 14 Perdas percentuais de teores de COS e N em Gleissolos

Os resultados apresentados na tabela 10 mostram que, no geral, foram observados menores perdas de nitrogênio em relação ao COS quando comparados com a mata do Gleissolo em todas as profundidades. As menores perdas de nitrogênio nestes solos podem ser explicadas pela sua imobilização, que ocorre durante a transformação do nitrogênio da forma inorgânica para formas orgânicas microbianas (aminoácidos, açúcares aminados, peptídeos, proteínas, ácidos nucleicos, quitina e compostos lignificados) mostrando o seu papel bioquímico na atividade microbiana do solo. Por isso, a sua permanência tende a ser maior do que a do COS (CAMARGO et al., 2008). Por outro lado, quando os microrganismos morrem, o N consumido por eles é imediatamente aproveitado pelos microrganismos vivos, isto é, a mineralização da matéria orgânica ocorre quase simultaneamente à imobilização do nitrogênio usado no crescimento, multiplicação, manutenção da microbiota, e assim o nitrogênio pode permanecer no solo durante muito tempo sob condições aeróbicas, e muito mais sob condições anaeróbicas. De acordo com Olk, Samson e Gapas (2007), a mineralização do nitrogênio é inibida em sistema monocultura de arroz em ambiente anaeróbico. Por isso, alguns autores sugerem a drenagem do solo permitindo decomposição aeróbica de resíduos de arroz e ou rotação de culturas como uma técnica melhorada para a dinâmica e fornecimento de N em solos sob cultivo de arroz irrigado. Isto é feito no presente experimento, após a colheita.

Há também a possibilidade do alagamento ter afetado com maior intensidade os microrganismos responsáveis pela mineralização do nitrogênio, em relação os que mineralizam o carbono. Segundo Fageria et al. (2011), em solos inundados há redução da atividade microbiana responsável pela mineralização do N para formas disponíveis (NH_4^+) e, conseqüentemente, há menores perdas deste elemento no sistema solo-planta.

A tabela 11 mostra o resultado da ANOVA para os estoques de COS e N padronizados para 0-20 e 20-40 cm. Houve diferenças significativas para estoques de COS a 0-20 e 20-40 cm, enquanto para N, isto só ocorre para 0-20 cm.

Tabela 10 Níveis de significância da ANOVA para estoques de COS e N

Fonte de variação	COS	N	
		-----0-20 cm-----	-----20-40 cm-----
Uso do solo	**		***
Uso do solo	*		n.s

* significativo a $p < 0,05$; ** a $p < 0,01$; *** a $p < 0,001$ e

n.s. não significativo

Tabela 11 Estoques de COS e N para diferentes profundidades-padrão após correção para a compactação do solo (massa equivalente)

Uso do solo	-----Mg ha ⁻¹ -----					
	COS	N	COS	N	COS	N
	----0-20 cm----		---20-40 cm---		---0-40 cm----	
Mata/Argissolo	72,5AB	7,12A	53,2AB	4,79A	126AB	11,9AB
Mata/Gleissolo	85,5 A	6,64A	78,0 A	5,92A	164 A	12,6 A
Arroz/Gleissolo	38,6BC	3,86B	37,9 B	3,69A	76,5B	7,56 B
Feijão/Gleissolo	33,9 C	3,99B	36,7 B	4,39A	70,7 B	8,37AB

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$)

A tabela 12 mostra que, estatisticamente, houve diferença significativa nos estoques de COS em todas as profundidades. A mata sobre Gleissolo apresentou maiores estoques quando comparado com os tratamentos cultivados

no mesmo solo. É interessante que, embora geralmente solos inundados possam estocar mais COS devido à anaerobiose, pode-se notar que o revolvimento intenso foi preponderante para a perda de estoques de COS. Resultados semelhantes foram relatados no experimento de longa duração (21 anos) em solo de várzea sob cultivo do arroz no Rio Grande de Sul (Rosa et al., 2011), em que os estoques de carbono na camada de 0-20 cm em um ecossistema natural foram maiores ($47,8 \text{ Mg ha}^{-1}$), em relação ao sistema de preparo convencional ($31,8 \text{ Mg ha}^{-1}$), mostrando perdas de C em 33,5 %. Nascimento et al. (2009), estudando solos de várzea com cultivo de arroz, observaram uma similaridade no estoque de COS em sistema de plantio direto, quando comparado ao do solo sob vegetação nativa, os quais apresentaram maiores estoques em relação ao sistema de plantio convencional (cerca de 56 %), na camada de 0-5 cm. Sistemas agrícolas conservacionistas, sem mobilização do solo ou com revolvimento mínimo, utilizando culturas que permitem maior aporte de matéria seca, tendem a preservar ou aumentar o estoque de COS (ROSA et al., 2011). Foram observadas diferenças significativas nos estoques de N na profundidade de 0-20 cm e 0-40 cm, em que menores valores foram dos Gleissolos cultivados com arroz e feijão. As perdas de N no Gleissolo cultivado, em relação a mata do Gleissolo, podem estar ligadas a volatilização, desnitrificação e lixiviação com a decomposição orgânica. Segundo Fageria, Santos e Cutrim (2007), o nitrogênio em arroz irrigado está sujeito a perdas por volatilização, lixiviação e desnitrificação. Quando se faz a adubação nitrogenada na superfície de solos inundados, as perdas do N são maiores por lixiviação, em relação à sua incorporação antes da inundação (FAGERIA e PRABHU, 2004).

5 CONCLUSÕES

FIGURAO Gleissolo cultivado com arroz inundado não promoveu sequestro de COS e N, em relação à vegetação nativa, o que motivou a hipótese formulada. Ao contrário, houve perda de mais da metade do COS, o que também ocorreu no Gleissolo sob feijão. Os teores de COS, em todos os tratamentos, foram maiores na superfície do solo, em razão do maior aporte de C na superfície. Embora os teores de COS e N tenham sido maiores no Gleissolo sob mata, em relação ao Argissolo sob mata, o mesmo não ocorreu para estoques de COS e N, pois o Argissolo possui densidade maior. Assim, o efeito da anaerobiose no Gleissolo não foi crucial para um maior sequestro de COS, nas profundidades testadas. A densidade do solo foi maior nos solos manejados, especialmente na camada de 10-20 cm.

REFERÊNCIAS

ABREU, C. A.; LOPES, A. S. Identificação de deficiências de macronutrientes em três solos de várzeas de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22. p. 1215-1224, nov./dez. 1987.

ABREU, E. M. A.; FERNANDES, A. R.; RUIVO, M. L. P. Variação temporal e vertical de atributos químicos de um Gleissolo do rio Guamá cultivado com Canaranas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 277-285, Mar./Abr. 2007.

ABREU JR., C. H. et al. Métodos analíticos utilizados em química do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e Mineralogia do Solo**. Viçosa: SBCS, 2009. v. 2, p. 529-685.

AMORIM, L. B. **Caracterização da serapilheira em caatinga preservada e mudanças no carbono do solo após o desmatamento sem queima em Recife-PE**. 2009. 62 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

ANDRADE, M. H. **Impactos da produção do arroz inundado sob a qualidade da água do rio Paraíba do sul-trecho Taubaté**. 2010. 88 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais)-Universidade de Taubaté, São Paulo, 2010.

ARAÚJO, J. K. S. et al. Humic haplustox under diferente land uses in a high altitude environment in the Agreste region of Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1337-1349, jul./ago. 2014.

ASSIS, C. P. et al. Carbono e nitrogênio em agregados de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 10, p. 1541-1550, out. 2006.

AZAMBUJA, I. H. V.; VERNETTI JR., F. J.; MAGALHÃES JR., A. M. Aspectos socioeconômicos da produção do arroz. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES JR., A. M. (Eds.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 23-44.

BAHN, H. L.; MCNEAL, B.L.; O'CONNOR, G. A. **Soil Chemistry**. New York: John Wiley & Sons, 1979. 329 p.

BEUTLER, A.N. et al. Propriedades físicas do solo e produtividade de arroz irrigado em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1601-1607, set./out. 2012.

BEUTLER, A. N. et al. Manejo do solo, palha residual e produtividade de arroz irrigado por inundação. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n. 3, p. 1153-1162, mai./jun. 2014.

BOHNEN, H. et al. Ácidos orgânicos na solução de um Gleissolo sob diferentes sistemas de cultivo de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 475-480, mai./jun. 2005.

CAMARGO, F. A. O. et al. Produção de ácidos orgânicos voláteis com a adição de palha de arroz em glei sob condições anaeróbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 337-342, 1993.

CAMARGO, F. A. O. et al. Aspectos fisiológicos e caracterização da toxidez de ácidos orgânicos voláteis em plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 523-529, mai./jun. 2001.

CAMARGO, F. A. O. et al. Nitrogênio orgânico do solo. In: SANTOS, G. A. et al. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2 ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 87-99.

CARDOSO, E. L. et al. Estoques de carbono e nitrogênio em solo sob florestas nativas e pastagens no bioma Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 9, p. 1028-1035, set. 2010.

CARMO, D. L.; SILVA, C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 1211-1220, jul./ago. 2012.

CARMONA, F. C. et al. Enxofre na água de irrigação e na solução do solo e rendimento de arroz em função da adubação sulfatada. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 14, n. 4, p. 66-71, out./dez. 2008.

CIPRANDI, M. A. O. **Avaliação da metodologia de determinação da acidez ativa e potencial em solos do Rio Grande do Sul**. 1993. 90 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

CONEN, F.; SMITH, K.A.; YAGI, K. Rice cultivation. In: READY, SMITH, P.; AMSTEL, A. (Eds.). **Methane and climate change**. London: Earthscan, 2010. p. 115-135.

CORAZZA, E. J. et al. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 425-432, mar./abr. 1999.

COSTA, F. S. **Estoques de carbono orgânico e efluxos de dióxido de carbono e metano de solos em preparo convencional e plantio direto no subtropical**

brasileiro. 2005. 127 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

DALCHIAVON, F. C. et al. Strategy of specification of management areas: rice grain yield as related to soil fertility. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 45-54, jan./fev. 2013.

DIECKOW, J. et al. Sistemas conservacionistas de preparo do solo e implicações no ciclo do carbono. São Carlos: **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, Documentos n. 12, 2004. 17 p.

DOBERMANN, A.; WITT, C. The potential impact of crop intensification on carbon and nitrogen cycling in intensive rice systems. In: KIRK, G. J. D.; OLK, D. C. (Eds.). **Carbon and nitrogen dynamics in flooded soils**. Los Baños: International Rice Research Institute, 2000. p. 1-26.

DON, A.; SCHUMACHER, J.; FREIBAUER, A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks: a meta-analysis. **Global Change Biology**, Oxford, v. 17, n.4, p. 1658-1670, Apr. 2011.

DORAN, G.; EBERBACH, P.; HELLIWELL, S. The impact of rice plant roots on the reducing conditions in flooded rice soils. **Chemosphere**, Amsterdam, v. 63, n. 11, p. 1892-1902, Jun. 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise do solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212 p.

FAGERIA, N. K. **Adubação e nutrição mineral da cultura do arroz**. Rio de Janeiro: Campus; Goiânia: Embrapa Arroz e Feijão, 1984. 341 p.

FAGERIA, N. K.; PRABHU, A. S. Controle de brusone e manejo de nitrogênio em cultivo de arroz irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 2, p. 123-129, fev. 2004.

FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B.; CUTRIM, V. A. **Eficiência de uso de nitrogênio por genótipos de arroz irrigado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, Comunicado Técnico n. 135, 2007. 3 p.

FAGERIA, N. K. et al. Chemistry of lowland rice soils and nutrient availability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 42, n. 16, p. 1913-1933, Sep. 2011.

FAJARDO, J. D. V.; SOUZA, L. A. J.; ALFAIA, S.S. Características químicas de solos de várzeas sob diferentes sistemas de uso da terra, na calha dos rios baixo Solimões e médio Amazonas. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 39, n. 4, p. 731-740, dez. 2009.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The state of food and agriculture 2006**. Rome: FAO, 2006. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/009/a0800e/a0800e00.HTM>>. Acesso em: 14 novembro de 2014.

FUENTES, M. et al. Conservation agriculture, increased organic carbon in the top-soil macro-ggregates and reduced soil CO₂ emissions. **Plant and Soil**, Berlim, v. 355, n. 1-2, p. 183-197, 2012.

GREEN, V. S. et al. Tillage impacts on soil biological activity and aggregation in a Brazilian Cerrado Oxisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1-2, p. 114-121, 2007.

GUIMARÃES, D. V. et al. Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 126, n. 1, p.177–182, 2013.

HANKE, A. et al. Does anoxic processing of dissolved organic matter affect organic–mineral interactions in paddy soils? **Geoderma**, Amsterdam, v. 228-229, p. 62–66, Sep. 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: The physical science basis**. Cambridge: Cambridge University, 2007. 996 p.

KIRK, G. J. D. **The biogeochemistry of submerged soils**. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. 291 p.

KÓGEL-KNABNER, I. et al. Biogeochemistry of paddy soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 157, n. 1, p. 1–14, 2010.

LAI, D.Y.F. Methane dynamics in northern peatlands: a review. **Pedosphere**, Pequim, v. 19, n. 4, p. 409-421, Ago. 2009.

LEITE, M. H. S. et al. Perdas de solo e nutrientes num Latossolo Vermelho-Amarelo ácrico típico, com diferentes sistemas de preparo e sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 689-699, mai./jun. 2009.

LIMA, M. A.; CABRAL, O. M. R.; MIGUEZ, J. D. G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. 397 p.

LIMA, M. A. et al. Influence of continuous and intermittent water regime on methane emission from irrigated rice crops in the Southeast of Brazil. In: Third International Methane and Nitrous Oxide Mitigation Conference, 2003, **Proceedings...** Beijing: China Coal Information Institute, 2003. v. 1, p. 17-21.

LINQUIST, B. A. et al. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 135, p. 10–21, Aug. 2012.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007, p. 1-64.

LOPES, E. L. N. et al. Características químicas de um Gleissolo sob diferentes sistemas de uso, Características químicas de um Gleissolo sob diferentes sistemas de uso, nas margens do rio Guamá, Belém, Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais**, Belém, v. 1, n. 1, p. 127-137. Jan./abr. 2006.

MACHADO, M. O. Caracterização e adubação do solo. In: **Fundamentos para a cultura do arroz irrigado**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 129-177.

MAGALHÃES, R. C.; GOMES, R. C. M. Mineralogia e química de solo de várzea e suas susceptibilidades no processo de terras caídas na comunidade do Divino Espírito Santo-AM. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 25, n. 3, p. 609-621, set./dez. 2013.

MCBRIDE, M. B. **Environmental chemistry of soil**. New York: Oxford University, 1994. 406 p.

MENGEL, K. Turnover of organic nitrogen in soils and its availability to crops. **Plant and Soil**, Berlim, v. 181, n. 1, p.83-93, Apr. 1996.

MENTGES, M. I. et al. Alterações estruturais e mecânicas de solo de várzea cultivado com arroz irrigado por inundação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 221-231, jan./fev. 2012.

MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA-MCT 2009. **Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa-Valores preliminares**. Brasília: MCT, 2009. 19 p. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0207/207624.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2015.

MORAES, J. F. B.; FREIRE, C. J. S. Variação do pH, da condutividade elétrica e da disponibilidade dos nutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio em quatro solos submetidos a inundação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 9, n. 9, p. 35-43, 1974.

NASCIMENTO, P. C. et al. Sistemas de manejo e a matéria orgânica de solo de várzea com cultivo de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 33, n. 6, p. 1821-1827, 2009.

NAYAK, D. R.; BABUB, Y. J.; ADHYA, T.K. Long-term application of compost influences microbial biomass and enzyme activities in a tropical Aeris Endoaquept planted to rice under flooded condition. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 39, n. 8, p.1897–1906, Aug. 2007.

NIEROP, K.G.J.; JANSEN, B.; VERSTRATEN, J.A. Dissolved organic matter, aluminium and iron interactions: precipitation induced by metal/carbon ratio, pH

and competition. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 300, n. 1, p. 201-211, 2002.

NIMMO, J. R.; PERKINS, K. S. Aggregate stability and size distribution. In: DANE, J. H. TOPP, G. C. (Eds.). **Methods of soil analysis: Part 4- physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, n. 5, p. 317-328, 2002.

O'BRIEN, S.O.; JASTROW, J.D. Physical and chemical protection in hierarchical soil aggregates regulates soil carbon and nitrogen recovery in restored perennial grasslands. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 61, p. 1-13, Jun. 2013.

OLK, D. C.; SAMSON, M. I.; GAPAS, P. Inhibition of nitrogen mineralization in young humic fractions by anaerobic decomposition of rice crop residues. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 58, n. 1, p. 270-281, Feb. 2007.

PÁDUA, E. J.; GUERRA, A. R.; ZINN, Y. L. Modelagem da densidade do solo em profundidade sob vegetação nativa em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 725-736, maio./jun. 2015.

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de cátions no solo alterada pelo sistema de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 1031-1041, jul./ago. 2009.

PINTO, L. F. S.; LAUS, N. L. A.; PAULETTO, E. A. Solos de várzea do sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M (Eds.). **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 75-95.

PONNAMPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, v. 24, p. 29-96, 1972.

PONNAMPERUMA, F. N. Comportamento de elementos menores em suelos arroceros. In: **International Rice Research Institute-IRRI**. Anual Report for 1976. Los Bãnos, 1977.

RAIJ, B.V. et al. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

RESCK, D. V. S. et al. Dinâmica da matéria orgânica no Cerrado. In: SANTOS, G. A. et al. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 359-417.

RHODEN, A. C. et al. Mineralização anaeróbia do nitrogênio em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1780-1787, nov./dez. 2006.

ROSA C.M. et al. Conteúdo de carbono orgânico em Planossolo Háplico sob sistema de manejo do arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1769-1776, Set./Out. 2011.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 86 p.

ROSSO, J. C. **Avaliação do consumo de água em lavouras de arroz irrigado no sistema pré-germinado nas condições climáticas do sul catarinense**. 2007. 64.p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2007. 64 p.

SAKAZAKI, R.T; ALVES, J.M.A; LOPES, G.N. Arroz irrigado em Roraima. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 2, n. 1, p. 69-76, jan/jun. 2008.

SÁNCHEZ, P. A. **Properties and management of soils in the tropics**. New York: John Wiley & Sons, 1976. 618 p.

SANTOS, E. **Carbono, nitrogênio e relação C/N em Gleissolo e Cambissolo sob diferentes tipologias vegetais na área de ocorrência da floresta ombrófila densa, Antonina PR**. 2007. 104 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SANTOS, A. C.; SALCEDO, I. H. Fertilidade nas áreas de várzea e topo em função do uso do solo e posição do relevo. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Paraíba, v. 10, n. 2, p. 83-90. 2010.

SANTOS, C. E. dos. et al. **Anuário brasileiro do arroz**. Santa Maria do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz. 2013. 136 p. Disponível em: <file:///C:/Users/FNABH/Downloads/3880_arroz_2013.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2015.

SCHMIDT, F. et al. Impacto do manejo da água na toxidez por ferro no arroz irrigado por alagamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37. p. 1226-1235, Set./Out. 2013.

SEY, B. K. et al. Heterogeneity in carbon dioxide, nitrous oxide and methane production from aggregates of a cultivated sandy-loam soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 40, n. 9, p. 2468-2473, Sep. 2008.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 275-374.

SILVA, L. S.; SOUSA, R. O.; POCOJESKI, E. Dinâmica da matéria orgânica em ambientes alagados. In: SANTOS, G. A. et al. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 525-529.

SILVA, L.S. et al. Dinâmica da emissão de metano em solos sob cultivo de arroz irrigado no sul do Brasil, **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 35. n. 1, p. 473–481, 2011.

SIQUEIRA, J. O.; FRANCO, A. A. **Biotechnologia do solo: Fundamentos e perspectivas**. Brasília: MEC-ESAL-FAEP-ABEAS, 1988. 236 p.

SIQUEIRA, J. O.; SOARES, C. R. F. S.; SILVA, C. A. Matéria orgânica em solos de áreas degradadas. In: SANTOS, G. A. et al. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 495-520.

SIX, J.; ELLIOT, E.T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 32, n. 14, p. 2099-2103, Dec. 2000.

SMITH, P. et al. Agriculture. In: METZ, B. et al. (Eds.). **Climate Change 2007: Mitigation**. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 497–540.

SOUSA, R. O. **Oxirredução em solos alagados afetada por resíduos vegetais**. 2001. 164 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

SOUSA, R. O.; BOHNEN, H.; MEURER, E. J. Composição da solução de um solo alagado conforme a profundidade e o tempo de alagamento, utilizando novo método de coleta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 343-348, Abr./Jun. 2002.

SOUSA, R. O.; CAMARGO, F. A. O.; VAHL, L. C. Solos Alagados: Reações de redox. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 2. ed. Porto Alegre: Gênese, 2004. p. 208-237.

SOUSA, R. O.; VAHL, L. C.; OTERO, X. L. Química de solos alagados. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: SBCS, 2009. v. 2, p. 485-528.

STRECK, N. A. et al. Comparação de parâmetros de crescimento e de desenvolvimento de dois biótipos de arroz vermelho com genótipos de arroz irrigado. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 2, p. 349-360, 2008.

THOMPSON, A. et al. Iron-oxide crystallinity increases during redox oscillations. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Tucson, v. 70, n. 7, p. 1710-1727, Apr. 2006.

TOMÉ JR., J. B. **Manual para interpretação de análise do solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. 247 p.

VACCARI, F.P. et al. Land use change and soil organic carbon dynamics in Mediterranean agro-ecosystems: The case study of Pianosa Island. **Geoderma**, Amsterdam, v. 170, p. 29-36, Jan. 2012.

WALTER, M.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A. Arroz: composição e características nutricionais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 1184-1192, jul. 2008.

YAN, X. et al. Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 130, p. 42-51, Jun. 2013.

YAN, Y. et al. Soil organic carbon and total nitrogen in intensively managed arable soils. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 150, p. 102–110, Mar. 2012.

ZHANG, H. et al. D. Influence of 20–Year organic and inorganic fertilization on organic carbon accumulation and microbial community structure of aggregates in an intensively cultivated sandy loam soil. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 9, n. 3, p. 1-11, 2014.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, n. 1, p. 28-40, 2005.

ZINN, Y. L. et al. Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian Cerrado: texture and mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, n. 4, p. 1215-1224, 2007.