

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**USO E MONITORAMENTO DE INDICADORES MICROBIOLÓGICOS PARA  
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS SOLOS DE CERRADO SOB  
DIFERENTES AGROECOSSISTEMAS**

**LUCIANA GOMES DA SILVA**

**ORIENTADOR: EIYTI KATO  
CO-ORIENTADORA: IÊDA DE CARVALHO MENDES**

**MARÇO/2008**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Luciana Gomes da

Uso e monitoramento de indicadores microbiológicos para avaliação da qualidade dos solos de cerrado sob diferentes agroecossistemas. /Luciana Gomes da Silva; orientação de Eiyti Kato. – Brasília, 2008.

117 p. : il.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2008.

1- Indicadores de qualidade de solo. 2- Carbono da biomassa microbiana. 3- Atividade enzimática. 4- Cerrado. I. Kato, E. II. Doutor.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, L.G. da. **Uso e monitoramento de indicadores microbiológicos para avaliação da qualidade dos solos de cerrado sob diferentes agroecossistemas.** Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2008, xx p. Dissertação de Mestrado.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Luciana Gomes da Silva

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Uso e monitoramento de indicadores microbiológicos para avaliação da qualidade dos solos de cerrado sob diferentes agroecossistemas.

GRAU: Mestre

ANO: 2008

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Luciana Gomes da Silva

CPF: 701.817.991-20

Q.R 404 conjunto 10 casa 23

72318-111 Brasília/DF – Brasil

E-mail: luciana.silva@conab.gov.br

## **Dedicatória**

À Dra. Ieda de Carvalho Mendes pela admirável dedicação, incentivo e apoio.

## **Agradecimentos**

À minha querida mamãezinha e ao meu pai que me deram muito apoio, amor e carinho.

À Universidade de Brasília (UnB), a Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária (FAV) e principalmente a Embrapa Cerrados pela oportunidade.

À pesquisadora Dra. Ieda de Carvalho Mendes por me acompanhar, desde a graduação, nos ensinamentos mais importantes em relação a minha vida profissional, agradeço pela orientação e amizade tão valiosas.

Ao professor Eiyti Kato pela orientação, confiança e amizade.

Ao pesquisador Dr. Fábio Bueno dos Reis Júnior pela relevante orientação, sugestões e principalmente pela amizade.

Ao professor Marcos Rogério Tótola (UFV) pela ajuda, sugestões e por ser tão prestativo para tirar minhas dúvidas.

Ao pesquisador Dr. Marcelo Fernandes (Embrapa Tabuleiros Costeiros) pela imprescindível ajuda nas análises estatísticas.

Ao pesquisador Dr. Djalma Martinhão pelas importantes sugestões.

Aos pesquisadores Teodoro e Lorival Vilela da Embrapa Cerrados pelas valiosas informações referentes às áreas experimentais.

Aos funcionários Osmar Teago e Clodoaldo pela ajuda nas coletas de solo.

À funcionária Maria das Dores, em 1º lugar pela amizade e depois pela ajuda fundamental nas análises laboratoriais.

Aos amigos do laboratório da Embrapa Cerrados: Joana, Anderson, Edvaldo, Janaína, Bernardo, Jaqueline, Sibebe, André, Ana Paula, Isaias, Éder.

À minha melhor amiga Camila Viana da Silva pela amizade e inspiração.

À grande amiga Jaqueline Brandão pelas maravilhosas conversas tão agradáveis que tínhamos no cpac e pelo apoio.

Às minhas amigas da Conab Gisele e Karol por ter ido prestigiar minha defesa e a amiga Candice pela torcida.

Ao meu amigo professor Borgo (UnB) pelo incentivo.

Aos professores da FAV pelos ensinamentos adquiridos, em especial, professora Lucrécia, professor Wenceslau e professora Marilusa.

Aos funcionários da secretaria da pós-graduação pelo bom atendimento sempre que precisei.

A CAPES pelo apoio financeiro.

E a todos que de alguma forma contribuíram com este trabalho.

## ÍNDICE

RESUMO GERAL .....	13
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
2.1 DESENVOLVIMENTO AGRÍCOLA NO BIOMA CERRADO .....	20
2.2 MATERIA ORGÂNICA DO SOLO .....	21
2.3 BIOMASSA MICROBIANA.....	23
2.4 ATIVIDADE ENZIMÁTICA DOS SOLOS.....	27
2.5 SISTEMAS DE CULTIVO DO SOLO.....	30
2.5.1 SISTEMA DE PLANTIO CONVENCIONAL E SISTEMA DE PLANTIO DIRETO.....	30
2.5.2 SISTEMAS FLORESTAIS.....	32
2.5.3 SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA E PECUÁRIA.....	34
2.6 AVALIAÇÃO E BIOINDICADORES DE QUALIDADE DE SOLO.....	35
2.7 QUALIDADE AMBIENTAL - USO SUSTENTÁVEL DOS SOLOS .....	37
2.8 FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA AVALIAR A QUALIDADE DE SOLO.....	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	43

CAPÍTULO I .....	61
RESUMO.....	62
1. INTRODUÇÃO .....	65
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	66
2.1 DESCRIÇÃO DOS LOCAIS .....	66
2.1.1 ÁREA COM SISTEMAS DE PLANTIO DIRETO E PLANTIO CONVENCIONAL .....	67
2.1.2 ÁREA COM SISTEMAS FLORESTAIS .....	68
2.1.3 ÁREA COM SISTEMAS INTEGRADOS LAVOURA-PECUÁRIA .....	68
2.2 COLETA, PREPARAÇÃO E ARMAZENAMENTO DAS AMOSTRAS.....	69
2.3 ANÁLISES QUÍMICAS .....	70
2.4 ANÁLISES FÍSICAS .....	70
2.5 ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS .....	71
2.5.1 CARBONO DA BIOMASSA MICROBIANA (CBM) .....	71
2.5.2 ATIVIDADE ENZIMÁTICA: $\beta$ -GLICOSIDASE, FOSFATASE ÁCIDA E ARILSULFATASE.....	71
3. ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	72
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
4.1 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS.....	73
4.2 CARBONO DA BIOMASSA MICROBIANA (CBM).....	75
4.3 ATIVIDADE ENZIMÁTICA.....	76
4.4 ANÁLISES MULTIVARIADAS.....	79
5. CONCLUSÕES .....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	83

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1- PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS NA PROFUNDIDADE 0 A 10 CM .....	91
TABELA 2- PROPRIEDADES QUÍMICAS DOS SOLOS NA PROFUNDIDADE 0 A 10 CM .....	92
TABELA 3- PROPRIEDADES BIOLÓGICAS DOS SOLOS NA PROFUNDIDADE 0 A 10 CM .....	93
TABELA 4- CONTRASTES MÉDIOS E SUAS SIGNIFICÂNCIAS PARA OS INDICADORES QUÍMICOS NAS ÁREAS DE SISTEMA INTEGRADOS LAVOURA-PECUÁRIA.....	97
TABELA 5- CONTRASTES MEDIOS E SUAS SIGNIFICANCIAS PARA OS INDICADORES MICROBIOLÓGICOS NAS AREAS DE SISTEMA INTEGRADOS LAVOURA-PECUARIA.....	97
TABELA 6- CONTRASTES MEDIOS E SUAS SIGNIFICANCIAS PARA OS INDICADORES FÍSICOS NAS ÁREAS DE SISTEMA INTEGRADOS LAVOURA-PECUÁRIA .....	98
TABELA 7- COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE OS ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E MICROBIOLÓGICOS E OS EIXOS 1 E 2 DAS ANÁLISES DE COMPONENTES PRINCIPAIS .....	99
TABELA 8- ESCORES DE SENSIBILIDADE DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E MICROBIOLÓGICOS UTILIZADOS NA MATRIZ PRIMÁRIA PARA SEPARAR OS TRATAMENTOS, NAS TRÊS ÁREAS DE ESTUDO.....	99

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1- ANÁLISES DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) REPRESENTANDO A DISTRIBUIÇÃO DOS AGROECOSSISTEMAS NA ÁREA I DE ACORDO COM AS SIMILARIDADES NAS PROPRIEDADES DOS SOLOS CONSIDERADAS NA MATRIZ PRIMÁRIA..... 94

FIGURA 2- ANÁLISES DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) REPRESENTANDO A DISTRIBUIÇÃO DOS AGROECOSSISTEMAS NA ÁREA II DE ACORDO COM AS SIMILARIDADES NAS PROPRIEDADES DOS SOLOS CONSIDERADAS NA MATRIZ PRIMÁRIA..... 95

FIGURA 3- ANÁLISES DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) REPRESENTANDO A DISTRIBUIÇÃO DOS AGROECOSSISTEMAS NA ÁREA III DE ACORDO COM AS SIMILARIDADES NAS PROPRIEDADES DOS SOLOS CONSIDERADAS NA MATRIZ PRIMÁRIA..... 96

CAPÍTULO II .....	100
RESUMO .....	101
1. INTRODUÇÃO .....	103
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	105
2.1 DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO .....	105
2.1.1 ÁREA COM SISTEMAS DE PLANTIO DIRETO E PLANTIO CONVENCIONAL .....	105
2.1.2 ÁREA COM SISTEMAS INTEGRADOS LAVOURA-PECUÁRIA .....	106
2.2 COLETA, PREPARAÇÃO E ARMAZENAMENTO DAS AMOSTRAS .....	107
2.3 ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS, QUÍMICAS E FÍSICAS .....	108
2.4 USO DO SOFTWARE SIMOQS – SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO SOLO .....	108
2.5.PADRONIZAÇÃO E NORMALIZAÇÃO DOS VALORES DOS INDICADORES DE QUALIDADE .....	111
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	113
4. CONCLUSÕES .....	116
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	120

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1- DETALHAMENTO DAS ROTAÇÕES E RELAÇÃO DE CALCÁRIO, NITROGÊNIO, FÓSFORO, POTÁSSIO, MICRONUTRIENTES E GESSO APLICADOS NO EXPERIMENTO DE ROTAÇÃO LAVOURA E PECUÁRIA NO PERÍODO DE 1991-2006 .....	123
TABELA 2- ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS UTILIZADOS NO BANCO DE DADOS DO SIMOQS PARA CALCULAR O ÍNDICE DE QUALIDADE DE SOLO DAS ÁREAS DE ROTAÇÃO SOJA-MILHO.....	126
TABELA 3- ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS UTILIZADOS NO BANCO DE DADOS DO SIMOQS PARA CALCULAR O ÍNDICE DE QUALIDADE DE SOLO NA ÁREA SOB SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA E PECUARIA.....	127
TABELA 4- ATRIBUTOS QUÍMICOS DOS SOLOS DAS ÁREAS DE ROTAÇÃO SOJA-MILHO SOB PD E PC E ÁREAS SOB SISTEMAS INTEGRADOS LAVOURA-PECUÁRIA REFERENTES AO ANO DE 2006 UTILIZADOS NO BANCO DE DADOS DO SIMOQS PARA CALCULAR O ÍNDICE DE QUALIDADE DE SOLO .....	128
TABELA 5- ATRIBUTOS FÍSICOS DOS SOLOS DAS ÁREAS DE ROTAÇÃO SOJA-MILHO SOB PD E PC E ÁREAS SOB SISTEMAS INTEGRADOS LAVOURA-PECUÁRIA REFERENTES AO ANO DE 2006 UTILIZADOS NO BANCO DE DADOS DO SIMOQS PARA CALCULAR O ÍNDICE DE QUALIDADE DE SOLO.....	129
TABELA 6- PESOS NUMÉRICOS ASSOCIADOS AOS INDICADORES E ÀS FUNÇÕES DO SOLO PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DE SOLO (IQS) REFERENTES AO ANO DE 2006 .....	130
TABELA 7- PESOS NUMÉRICOS ASSOCIADOS AOS INDICADORES E ÀS FUNÇÕES DO SOLO PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE QUALIDADE BIOLÓGICA DO SOLO (IQBS) .....	131
TABELA 8- ESTRUTURA DO MODELO PARA DETERMINAÇÃO DO IQS .....	132
TABELA 9- PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DE PONTUAÇÃO DOS INDICADORES DE QUALIDADE DE SOLO PARA O MODELO CERRADO SENTIDO RESTRITO .....	133

TABELA 10- PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DE PONTUAÇÃO DOS INDICADORES DE QUALIDADE DE SOLO PARA O MODELO CULTURAS ANUAIS E PASTAGENS MUITO EXIGENTES, SOLO ARGILOSO ..... 134

TABELA 11- PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DE PONTUAÇÃO DOS INDICADORES DE QUALIDADE DE SOLO PARA O MODELO PASTAGENS POUCO EXIGENTES, SOLO ARGILOSO ..... 135

TABELA 12- ÍNDICES DE QUALIDADE BIOLÓGICA DO SOLO (IQBS) E ÍNDICES DE QUALIDADE DE SOLO (IQS) DA ÁREA I, ROTAÇÃO MILHO-SOJA SOB PD E PC, CALCULADOS UTILIZANDO O SIMOQS ..... 136

TABELA 13- ÍNDICES DE QUALIDADE BIOLÓGICA DO SOLO (IQBS) E ÍNDICES DE QUALIDADE DE SOLO (IQS) DA ÁREA II, SISTEMAS INTEGRADOS LAVOURA E PECUÁRIA, CALCULADOS UTILIZANDO O SIMOQS ..... 136

# USO E MONITORAMENTO DE INDICADORES MICROBIOLÓGICOS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS SOLOS DE CERRADO SOB DIFERENTES AGROECOSSISTEMAS

## RESUMO GERAL

Embora a avaliação da qualidade de um solo seja uma tarefa complexa, sua determinação tem sido sugerida como uma ferramenta importante para acessar a sustentabilidade de longo prazo dos sistemas agrícolas. A seleção dos atributos do solo que servirão como indicadores de qualidade de solo, os níveis críticos desses atributos e como agregá-los em um índice de qualidade são algumas das dificuldades encontradas para quantificar a qualidade do solo.

No capítulo 1 dessa tese foi avaliado o uso do carbono da biomassa microbiana (CBM) e da atividade enzimática ( $\beta$ -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase) como indicadores de qualidade do solo em diversos agroecossistemas da região dos cerrados comparando-os a atributos químicos (pH, matéria orgânica, teores de P, Ca, Mg, K, CTC e saturação por alumínio) e físicos (densidade aparente, porosidade total, macroporosidade e microporosidade) do solo. Amostras de solo foram coletadas em fevereiro de 2006, na profundidade de 0 a 10 cm, em três áreas: área I, rotação soja/milho sob plantio direto (PD) e plantio convencional (PC) iniciado em 1992; área II, plantio de 16 anos de idade com as espécies florestais: pinus (*Pinus tecunumanii*), eucalipto (*Eucalyptus grandis*) e carvoeiro (*Sclerolobium paniculatum* Vogel) e área III, experimento iniciado em 1991 com sistemas integrados lavoura/pecuária onde foram avaliados cinco sistemas de manejo: pastagem contínua de gramínea, pastagem consorciada contínua, rotação de pastagem consorciada/lavoura, rotação lavoura/pastagem consorciada e lavoura contínua sob PD. Em cada local, áreas adjacentes sob vegetação nativa de Cerrado foram incluídas no estudo sendo utilizadas como referência das condições originais do solo. Uma análise de componentes principais destacou a presença dos indicadores microbiológicos entre os parâmetros com maior sensibilidade para diferenciar os agroecossistemas avaliados reforçando a importância da inclusão dos mesmos nos estudos e nos cálculos dos índices de qualidade de solo. De uma maneira geral, as diferenças detectadas por esses indicadores foram mais acentuadas quando os agroecossistemas foram comparados às áreas sob vegetação nativa. Mesmo assim os indicadores microbiológicos foram capazes de revelar

diferenças entre os agroecossistemas que, muito provavelmente, não teriam sido observadas com o uso das análises de rotina de química e física de solo, especialmente na área III.

No capítulo 2 o software SIMOQS, “Sistema de Monitoramento da Qualidade do Solo”, desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa, foi utilizado para calcular Índices de Qualidade do Solo (IQS) usando atributos químicos (pH, matéria orgânica, teores de P, Ca, Mg, K, CTC e saturação por alumínio), físicos (densidade aparente, porosidade total, macroporosidade e microporosidade) e biológicos (carbono da biomassa microbiana, atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase) e para monitorar no período de 1998 a 2006 a qualidade do solo nas áreas 1 e 3 avaliadas no capítulo 1. O uso do SIMOQS foi eficaz como ferramenta para o monitoramento da qualidade do solo nos diferentes agroecossistemas avaliados. Através dos cálculos do IQS foi possível confirmar os benefícios das pastagens bem manejadas (principalmente quando em consórcio com leguminosas), da rotação lavoura/pastagem e do plantio direto como sistemas de manejo capazes de melhorarem a qualidade dos solos de cerrado.

**Palavras-chave:** carbono da biomassa microbiana, atividade enzimática do solo, índices de qualidade de solo, plantio direto, plantio convencional, pinus, eucalipto, pastagem, sistemas integrados lavoura/pecuária.

# MONITORING AND USE OF MICROBIOLOGICAL INDICATORS TO EVALUATE CERRADOS SOIL QUALITY UNDER DIFFERENT MANAGEMENT SYSTEMS

## ABSTRACT

Although evaluating soil quality is a complex issue, its determination has been suggested as an important tool to assess the long term sustainability of agricultural ecosystems. The selection of which soil attributes will compose a soil quality index, their critical levels and their combination in a soil quality index are some of the difficulties to quantify soil quality.

Chapter one evaluated the use of microbial biomass carbon (MBC) and soil enzyme activities as indicators of soil quality under different management systems in the cerrado region, comparing them to chemical (pH, organic matter, P, Ca, Mg, K, CEC and Al saturation) and physical (bulk density, macro, micro and total porosity) soil attributes. In march 2006, soil samples were collected to a depth of 10 cm in three areas: area I) corn/soybean rotation under no-tillage (NT) and conventional tillage (CT) initiated in 1992; area II) 16 year-old forest systems with pinus (*Pinus tecunumanii*), eucalyptus (*Eucalyptus grandis*) and a cerrado native species called carvoeiro (*Sclerolobium paniculatum* Vogel); area III) an experiment initiated in 1991 where annual cropping systems are integrated with pastures ( five treatments were evaluated: continuous grass pastures, continuous grass and legume based pastures, continuous annual cropping systems, annual cropping systems integrated with grass and legume based pastures and grass and legume based pastures integrated with annual cropping systems). Native cerrado fragments adjacent to the three areas were used as references. As compared to the CT, in area I, NT resulted in the accumulation of organic matter , nutrients, MBC and soil enzyme activities in the first 10cm. In area II, the MBC under the native cerrado areas was greater than under the forest systems. In this area, the lowest values of acid phosphatase and arilsulfatase were determined under pinus whereas the eucalyptus presented the greatest  $\beta$ - glucosidase activity. In area III, greater acid phosphatase and arylsulfatase activities were observed under the continuous grass and legume based pasture as compared to the continuous annual cropping system. PCA analysis showed that the microbial indicators presented the greatest sensibility to distinguish the agroecosystems evidencing the importance of their inclusion in a

minimum data set to be considered in the studies and in the calculation of soil quality indexes.

In chapter two, the software SIMOQS (Soil Quality Monitoring System), developed at the Viçosa Federal University, was used to calculate soil quality indexes (SQI) using chemical (pH, organic matter, P, Ca, Mg, K, CEC and Al saturation), physical (bulk density, macro, micro and total porosity) and biological (microbial biomass carbon,  $\beta$ -glucosidase, acid phosphatase, and arylsulfatase activities) indicators and for monitoring soil quality under different management systems from 1998 to 2006. Soil samples were collected in areas 1 and 3 evaluated in chapter one. SIMOQS was an efficient tool to assess soil quality in the different agroecosystems evaluated. The benefits of pastures (particularly the legume based pasture), annual crops integrated with legume based pastures and of no-tillage systems were confirmed through their greater SQI.

**Key words:** microbial biomass carbon, soil enzyme activities, soil quality index, no-tillage, conventional tillage, pine, eucalyptus, pastures, lay/farming systems.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Ultimamente, tem-se notado que o nível de consciência das pessoas em relação às questões ambientais vem aumentando significativamente, o que inclui argumentar que a qualidade ambiental seja a base para a preservação da vida das futuras gerações. Esses questionamentos envolvem também as preocupações com impactos que a agricultura vem provocando no meio ambiente, o que tem estabelecido consideráveis mudanças estruturais no meio rural e nas práticas adotadas para a produção agrícola.

O manejo inadequado dos solos causa a perda de matéria orgânica, muito importante para a fertilidade dos solos dos Cerrados, intensifica os processos de erosão, altera as características físicas e químicas do solo sendo o grande responsável pela existência de áreas em processos de degradação (Dias & Griffith, 1998).

Devido à escassez de conhecimento sobre o funcionamento biológico dos solos da região dos Cerrados sob diferentes sistemas de produção, cada vez torna-se mais freqüente as pesquisas que favoreçam um melhor entendimento sobre as propriedades microbiológicas dos solos de cerrado sob vegetação nativa e sobre os impactos de sistemas agrícolas convencionais e conservacionistas no funcionamento dos processos microbiológicos desses solos.

A necessidade de avaliar as propriedades do solo tem crescido devido ao interesse dos pesquisadores e agricultores em saber quais são os efeitos das práticas de manejo sobre a qualidade do solo, já que é uma questão que está diretamente relacionada à sustentabilidade das funções dos agroecossistemas. Neste contexto, é considerável afirmar que quando a terra é utilizada em conformidade com sua capacidade, ou seja, com sua aptidão para exercer a sua função efetivamente isso provavelmente depende de se adotar um sistema agrícola sustentável para este fim (Schoenholtz et al., 2000).

Um dos desafios atuais da pesquisa é como avaliar a qualidade de um solo, de modo simples, preciso e confiável.

Uma medida, recentemente estudada, capaz de acompanhar e avaliar as mudanças do solo é o uso de parâmetros microbiológicos, bioindicadores que detectam possíveis alterações ambientais num curto período de tempo (Mendes & Reis Junior, 2004).

Com o intuito de orientar o planejamento e a avaliação das práticas de manejo usadas, as propriedades biológicas e bioquímicas do solo, tais como: a taxa de

respiração, a atividade enzimática, a biomassa e diversidade microbiana podem funcionar como indicadores sensíveis possibilitando ser utilizados no monitoramento de possíveis modificações ambientais decorrentes do uso agrícola (Turco et al., 1994; Doran & Parkin, 1994; Santana & Bahia Filho, 1999).

No que se refere aos atributos biológicos, a biomassa microbiana do solo pode fornecer informações importantes sobre a dinâmica de um reservatório lábil da matéria orgânica do solo (Hungria & Araújo, 1994), ou seja, pode avaliar o tamanho da fração mais ativa e dinâmica da matéria orgânica. No entanto, mudanças provocadas na comunidade microbiana do solo podem influenciar no funcionamento do ecossistema e na qualidade do solo, refletindo, em longo prazo, na produtividade. Por isso, todos os fatores que influenciam negativamente os microorganismos e favorecem perdas da matéria orgânica, também ocasionam uma deterioração das propriedades físicas e químicas do solo (Mendes, 2003).

As análises de enzimas podem fornecer dados reprodutíveis de atividades de manejo sobre a comunidade microbiana (Bending et al., 2002). De acordo com Taylor et al. (2002), as análises das atividades da  $\beta$ -glicosidase, desidrogenase, fosfatase e arilsulfatase podem ser utilizadas para avaliar o componente biológico do solo (atividade microbiológica do solo e mineralização de substratos), pois são enzimas catalisadoras de reações envolvidas nas transformações biogeoquímicas nos ciclos do carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S).

No monitoramento da qualidade do ar e da água as pesquisas estão mais desenvolvidas para proporcionar uma avaliação mais aprimorada, contudo nenhum método isolado tem caráter amplo para monitorar e avaliar eficientemente a qualidade do solo (Glover et al., 2000), já que suas propriedades são de difícil mensuração e envolvem a necessidade de se determinar referenciais devido os vários tipos de solo existentes.

A avaliação da qualidade de um solo, para ter confiabilidade e consistência, exige um método sistemático para se determinar e interpretar as propriedades que possam ser usadas como indicadores e então representarem eficientemente as funções que um solo pode exercer (Tótola & Chaer, 2002). Por isso, é fundamental a formação de um banco de dados com informações que reúnam os atributos biológicos, como a biomassa microbiana e a atividade enzimática, e inter-relacione com suas propriedades físicas e químicas, sob os principais sistemas de manejo adotados.

O Sistema de Monitoramento da Qualidade do Solo ou SIMOQS (Chaer et al., 2004), desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa, permite ao usuário que tenha em mãos um conjunto de dados obtidos a partir da análise de características físicas, químicas e biológicas escolher um modelo ajustado para calcular um Índice de Qualidade de solos (IQS) e assim realizar o monitoramento da qualidade desse sistema em uma área de seu interesse.

Para gerar conhecimentos que possibilitem planejar o uso adequado do recurso que o solo pode oferecer, torna-se importante a necessidade de se avaliar a qualidade desse sistema.

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

a) Avaliar o uso de análises microbiológicas - a biomassa microbiana e a atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase - em áreas de Cerrado sob diferentes sistemas de uso da terra e em diversos Agroecossistemas, como indicadores de qualidade de solos, relacionando-as com atributos químicos e físicos.

b) Calcular o Índice de Qualidade do Solo através de uma ferramenta computacional (o software SIMOQS) monitorando a qualidade do solo sob diferentes sistemas de manejo no período de 1998 a 2006.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 Desenvolvimento Agrícola no Bioma Cerrado

O Bioma Cerrado é uma unidade ecológica típica da zona tropical, abrangendo uma área de aproximadamente 204 milhões de hectares e é caracterizado por uma vegetação de fisionomia e flora próprias.

A paisagem do Cerrado distingue-se por um gradiente de biomassa que vai desde o campo limpo de cerrado ao cerradão, passando pelo campo sujo de cerrado, campo cerrado e cerrado (*sensu strictu*) (Ribeiro & Walter, 1998). Além disso, possui manchas representativas dos outros biomas brasileiros (Almeida Jr., 1990).

Segundo Goedert (1980) os solos de cerrado são altamente dependentes da matéria orgânica, têm baixa capacidade de troca catiônica e são muito intemperizados e permeáveis, mas bem estruturados e com alta estabilidade de agregados. São solos profundos com potencial muito favorável para utilização, podendo a baixa fertilidade e a alta acidez serem corrigidas (Ramalho Filho & Beek, 1994).

A ocupação das terras do Cerrado transformou esta região na principal área de produção de carne bovina e de grãos do Brasil. O rápido aumento na produtividade agrícola ocorreu devido a programas de desenvolvimento para ocupar esse ecossistema, aos avanços tecnológicos no manejo do solo, da planta e do animal nos diferentes agroecossistemas e da seleção de cultivares adaptados às condições edafoclimáticas da região (Vilela et al., 2002).

Em relação à evolução da área plantada, produção e produtividade das principais culturas anuais nos Cerrados, as culturas da soja e do milho ganharam maior destaque já que pertencem ao grupo dos produtos para exportação e apresentavam melhores condições de mercado e preço pago aos produtores (Kluthcouski & Aidar, 2003) o que contribuiu para a intensificação desta atividade.

Por outro lado, até a década de 80, verificou-se um crescimento acentuado de mais de 300% nas pastagens cultivadas no Cerrado brasileiro, ao passo que as outras regiões do país expandiram suas pastagens em cerca de 15% (Sano et al., 1999). Provavelmente, mais de 50% da área de pastagem cultivada está plantada com a *Brachiaria decumbens* (Zimmer et al., 1994).

Vale ressaltar que, ao longo do tempo, o uso e a manutenção dessas pastagens dependem do manejo de implantação e das características físicas, químicas e biológicas das diferentes classes de solo em que são estabelecidas (Vitti, 2001). Atualmente, devido ao manejo inadequado de uso e de manutenção, essas pastagens, em sua grande parte, apresentam problemas de degradação.

O manejo inadequado dos solos tem intensificado os processos de erosão alterando as características físicas e químicas do solo e causando uma perda muito significativa de matéria orgânica, o que é relevante para a fertilidade dos solos dos Cerrados, e este é o grande responsável pela existência de áreas em processos de degradação (Dias & Griffith, 1998).

É necessário que os recursos naturais envolvidos no processo produtivo agropecuário, como o solo e a água, sejam conservados ou melhorados para dar continuidade aos ciclos produtivos, ou seja, é importante desenvolver uma agricultura sustentável nos Cerrados brasileiros e/ou nos agroecossistemas de qualquer outra região.

## **2.2 Matéria Orgânica do Solo**

A matéria orgânica do solo (MOS) é o resultado da acumulação de resíduos de plantas e animais parcialmente decompostos e parcialmente ressintetizados, submetidos a um contínuo ataque microbiano, sendo composta de carbono (C), oxigênio (O), hidrogênio (H), fósforo (P) e enxofre (S) (Silva & Resk, 1997). Roscoe et al. (2006) mostra que esses materiais em ativo estado de decomposição compõem a parte transitória da MOS, sendo sempre renovada, apresentando ainda a fração húmica, composta por materiais recalcitrantes, os quais passaram por um processo intenso de transformação, como ácidos húmicos e fúlvicos, além de matérias carbonizadas; e a parte viva da MOS constituindo a biomassa microbiana responsável pelos processos de decomposição.

Silva & Resk (1997) esquematizam a matéria orgânica do solo em dois grandes grupos: o componente vivo, que atinge menos de 4% do carbono orgânico total, composto pelas raízes das plantas, macrorganismos ou fauna e microrganismos; e componente morto, que pode atingir até 98% do C orgânico total, e este subdivide-se em fração leve (matéria macrorrgânica) e fração pesada que contém as substâncias húmicas,

que confere a maior porção da MOS, e não húmicas que persistem menos no solo, pois são atacadas pela biota do solo mais rapidamente que as substâncias húmicas.

A composição dos restos de plantas e animais é que vai definir os processos de transformação desses resíduos até a formação de húmus. Os componentes menos resistentes e com alta solubilidade são disponibilizados mais rapidamente enquanto que os mais resistentes podem permanecer no solo por muitos anos.

O tipo de vegetação, sua disponibilidade e qualidade e as condições ambientais definem a heterogeneidade e a taxa de decomposição do material depositado na superfície do solo (Correia & Andrade, 1999; Moreira & Siqueira, 2002).

A decomposição de resíduos de plantas e animais no solo é realizada pelo processo biológico básico, sendo inicialmente desintegrados pela ação da macro e mesofauna através de meios físicos e mecânicos e em seguida, sob condições apropriadas de temperatura, pH e umidade, os microrganismos processam a decomposição com conseqüente rápida perda de substâncias prontamente disponíveis. De acordo com Silva & Resk (1997), no processo de decomposição, o carbono é reciclado para a atmosfera na forma de  $\text{CO}_2$ , o nitrogênio pode se tornar disponível nas formas  $\text{NO}_3^-$  e/ou  $\text{NH}_4^+$ , e outros elementos, como S, P e vários micronutrientes tornam-se assimiláveis pelas plantas superiores. Contudo, parte dos nutrientes é assimilada e armazenada pelos microrganismos e outra parte é convertida em húmus estável através da biodegradabilidade das moléculas orgânicas pela ação de enzimas, principalmente de origem microbiana. As taxas de decomposição da matéria orgânica dependem da qualidade dos resíduos incorporados, da atividade microbiana e da ação de suas enzimas (Singh & Gupta, 1977; Swift et al., 1979).

A natureza química e a origem da MOS envolvem processos muito complexos e estabelecem extrema relação com as condições físicas, químicas e biológicas do solo e com fatores ambientais, promovendo a lenta recomposição da matéria orgânica no solo. Estima-se que para elevar a matéria orgânica de um solo de 3 para 4%, em um solo que recebe 2Mg/ha de resíduo por ano, seriam necessários em torno de 100 anos (Moreira & Siqueira, 2002).

A matéria orgânica favorece o aumento das trocas catiônicas no solo e, conseqüentemente, melhora a retenção de nutrientes e a absorção de alguns micronutrientes, aumenta a retenção de água, beneficia o desenvolvimento de microrganismos e pode vir a minimizar o efeito tóxico de elementos como o alumínio (Cantarella et al., 1992).

É bem estudada a contribuição da MOS na liberação de nutrientes a partir da matéria de origem vegetal em que essa capacidade supre parte da necessidade das plantas, favorecendo ainda o processo de reciclagem desses nutrientes no sistema solo-planta. Essa habilidade é dada pela parte viva da matéria orgânica do solo composta pela biomassa microbiana, que controla a decomposição e o acúmulo através dos processos de imobilização e mineralização servindo de fonte e dreno de nutrientes (Singh et al., 1989).

De acordo com Gama-Rodrigues (1999), a taxa de decomposição da MOS é menor em solos com baixa fertilidade e baixos teores de nutriente, o que propicia uma imobilização do elemento (Nitrogênio, por exemplo) na biomassa microbiana funcionando como reservatório.

O manejo inadequado dos solos resulta em desequilíbrio, causa perda da biodiversidade e degrada a matéria orgânica que sem reposição e nem manutenção da sua atividade deixa de exercer suas funções no solo não garantindo a sustentabilidade.

Dessa forma, a redução dos teores de matéria orgânica no solo pode ser um importante indicador da degradação de um ecossistema, pois é um indicador global da sustentabilidade do meio ambiente (Lal, 1999), já que inter-relaciona as propriedades químicas, físicas e biológicas simultaneamente.

### **2.3 Biomassa Microbiana**

A produtividade e qualidade dos ecossistemas estão estritamente relacionadas aos principais processos biológicos e bioquímicos do solo, como a ciclagem de nutrientes e a formação e/ou decomposição da matéria orgânica, e estes envolvem a presença de microorganismos. Nos ecossistemas naturais é mantida uma íntima e harmônica interação da cobertura vegetal com o sistema físico, químico e biológico do solo. Contudo, a incorporação de novas áreas ao processo produtivo interfere no equilíbrio e na dinâmica de qualquer ecossistema (Godoi, 2001 citado por Lanna, 2002).

No que se refere aos atributos biológicos, a biomassa microbiana do solo pode fornecer informações importantes sobre a dinâmica de um reservatório lábil da matéria orgânica do solo (Hungria & Araújo, 1994), ou seja, pode avaliar o tamanho da fração mais ativa e dinâmica da matéria orgânica.

A biomassa microbiana faz parte do componente vivo da MOS e representa de

1 a 4% do C total e 5% do N total do solo (Jenkinson & Powlson, 1976), é composta por bactérias, actinomicetos, fungos, algas e protozoários (Jenkinson & Ladd, 1981) que atuam não só na intemperização das rochas (origem do solo), formação e manutenção da estrutura do solo, como também na decomposição de resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes e degradação de alguns poluentes e metais pesados (biorremediação). Neste contexto, Mendes (2003) destaca que todos os fatores que influenciam negativamente os microorganismos e favorecem perdas da matéria orgânica, também ocasionam uma deterioração das propriedades físicas e químicas do solo.

As bactérias e os fungos respondem por cerca de 90% da atividade da biomassa microbiana (Siqueira et al., 1994). O tamanho da comunidade microbiana e a sua atividade determinam a intensidade com que os processos bioquímicos acontecem (Carvalho, 2005).

Os microorganismos decompõem a matéria orgânica, liberam nutrientes em formas disponíveis às plantas e degradam substâncias tóxicas (Kennedy & Doran, 2002). Pela ação dos microorganismos do solo, através do processo de mineralização, as formas orgânicas de nitrogênio, fósforo e enxofre são disponibilizadas para as plantas na forma inorgânica (Singh et al., 1989). Além disso, a biota do solo influencia na solubilização de minerais, contribuem para a estruturação e agregação do solo e podem atuar no controle biológico de patógenos.

No que diz respeito à disponibilidade de nutrientes, no metabolismo dos microorganismos ocorrem transformações que possibilitam a liberação de elementos essenciais ao desenvolvimento das plantas, representando um significativo suprimento em solos com baixa fertilidade.

Segundo Gama-Rodrigues (1999), a biomassa microbiana pode ser considerada um compartimento central do ciclo do C servindo como um interessante atributo para o estudo da ciclagem de nutrientes em distintos ecossistemas.

A quantidade de carbono que a biomassa de microorganismos do solo imobiliza em suas células representa o carbono da biomassa microbiana do solo. Sendo assim, o carbono contido na biomassa microbiana compõe uma importante reserva de energia e pode servir de indicador para avaliar o tamanho da comunidade microbiana do solo (Rice et al., 1996). Fatores que afetam a densidade e a atividade dos microorganismos nos solos exercem efeito direto na decomposição da matéria orgânica e conseqüentemente na assimilação do carbono.

A temperatura, umidade e aeração do solo, assim como a disponibilidade de

nutrientes e quantidade de substratos orgânicos exercem influência na comunidade microbiana do solo (Cattelan & Vidor, 1990); além disso, as partículas de argila dos solos protegem os microrganismos contra predadores e ainda disponibilizam fonte de energia através de compostos orgânicos e nutrientes adsorvidos (Smith & Paul, 1990). Por sua vez, esses fatores podem ser modificados pelo sistema de manejo adotado dependendo do grau de revolvimento do solo e da forma como os resíduos das culturas anteriores são depositados (Vargas & Scholles, 2000).

A vegetação influencia diretamente a biomassa microbiana. Estudos mostram que os desmatamentos ocasionam uma drástica redução na comunidade microbiana dos solos devido a modificações na estrutura, na quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo, o que leva a um desequilíbrio (Cerri et al., 1985; Campos, 1998). Segundo Schmitz (2003) a diversidade de vegetais sobre o solo conduz uma maior exploração dos espaços do solo pelas raízes, diversifica a composição de tecidos vegetais e de exsudatos radiculares aumentando a diversidade da biota do solo, que retroalimenta esta biodiversidade, estabelecendo novos nichos para a vida vegetal num equilíbrio harmônico.

A avaliação da biomassa microbiana tem sido proposta como um indicador do estado e das modificações da matéria orgânica, pois os microrganismos são muito sensíveis às alterações ocorridas no solo (Rice et al., 1996).

Diferentes métodos podem ser empregados na determinação da biomassa microbiana dos solos podendo estes serem diretos ou indiretos. Os métodos diretos envolvem a microscopia dos componentes da biomassa microbiana (bactérias e fungos) são bem antigos e vem sendo substituído por métodos indiretos, mais eficientes e precisos. Neste contexto se destacam os métodos indiretos clorofórmio-fumigação-incubação-CFI (Jenkinson & Powlson, 1976 a,b), clorofórmio-fumigação-extração-CFE (Vance et al., 1987), que são fundamentados na esterilização parcial de amostras de solo pela fumigação com clorofórmio, e a respiração induzida pelo substrato (Anderson & Domsch, 1978). No método CFI a determinação do tamanho da biomassa baseia-se no fluxo de CO<sub>2</sub> liberado das amostras de solo fumigadas e não fumigadas após um determinado período de incubação (geralmente de 10 dias). Já no método CFE, essa determinação é feita através da extração e quantificação do C-orgânico das amostras fumigadas e não fumigadas.

Apesar dos métodos CFI e CFE serem os mais usados atualmente nas rotinas laboratoriais, estes apresentam limitações, vantagens e desvantagens. O método CFI tem

limitações quando utilizado em solos ácidos e solos onde houve adição recente de material orgânico (Tate et al., 1988; Powlson, 1994; Martens, 1995). O método CFE foi proposto com o intuito de superar as limitações do CFI possibilitando maior sensibilidade aos resultados, mas envolve o uso de extratores de carbono bastante tóxicos, como o dicromato de potássio.

Contudo, vale destacar que na quantificação do carbono da biomassa microbiana utiliza-se um coeficiente para os cálculos,  $K_c$  para o método CFI e  $K_{ec}$  para o método CFE, que pode apresentar grandes variações, inclusive, como observou Ross (1990) as variações do coeficiente  $K_{ec}$  ocorreram entre diferentes estações do ano, para um mesmo tipo de solo, mostrando que o  $K_{ec}$  apresenta variação maior que o coeficiente  $K_c$ . Essas variações podem estar relacionadas com os diferentes teores de argila e matéria orgânica dos solos, pois o alto teor de argila protege a matéria orgânica da decomposição e torna os microrganismos menos ativos pelo alojamento em pequenos poros (Wang et al., 2003), o que vem a interferir na homogeneidade da fumigação e na reconstituição da população microbiana.

O coeficiente  $K_c$  corresponde ao fator de mineralização do C, ou seja, é a proporção de carbono microbiano liberado na forma de  $CO_2$  nos 10 dias de incubação, e depende da temperatura, sendo de 0,41 à 22°C e de 0,45 à 25°C (Anderson & Domsch, 1978; Siqueira et al., 1994).

Além destes, há os métodos da irradiação-incubação e irradiação-extração em que os microrganismos são eliminados através da radiação de microondas (Ferreira et al., 1999).

Modificações mensuráveis na biomassa microbiana do solo têm sido observadas em razão de diversas ações antrópicas como as práticas de preparo de solo, o manejo de plantas e adubação (Marchiori Júnior & Melo, 2000). Como o carbono da biomassa microbiana responde rapidamente a modificações dos teores de matéria orgânica, ele pode funcionar como indicador da qualidade de solos (Mele & Carter, 1993; Fauci & Dick, 1994) servindo como um instrumento de aferição da sustentabilidade de sistemas de produção.

A biomassa microbiana como componente lábil da fração orgânica do solo apresenta intenso poder de reciclagem e responde rapidamente às flutuações sazonais de umidade e temperatura, ao manejo de resíduos e cultivo dos solos (Gama-Rodrigues & De-Polli, 2000), e por isso pode funcionar como sensível indicador de mudanças nos teores totais de matéria orgânica antes mesmo que alterações nas propriedades químicas

e físicas dos solos sejam percebidas.

Diversos trabalhos mostraram a influência de diferentes sistemas de manejo na biomassa microbiana e matéria orgânica do solo (Sparling et al., 1992; Glover et al., 2000; Melero et al., 2005).

Segundo D'Andréa et al. (2002), estudando atributos biológicos como indicadores de qualidade do solo, o estabelecimento de pastagens e sistemas agrícolas em área de cerrado nativo diminui os teores de carbono da biomassa microbiana na camada superficial do solo.

## **2.4 Atividade Enzimática dos Solos**

Os microrganismos produzem enzimas extracelulares que degradam substâncias de elevado peso molecular formando compostos mais simples. As fontes de enzimas para o solo podem vir, além das células metabolicamente ativas, da morte dos microrganismos com conseqüente lise celular, dos vegetais e da fauna (Burns, 1986).

Quando uma proteína enzimática é liberada para o solo, ela pode ser imediatamente metabolizada pelos microrganismos ou se associar física ou quimicamente aos colóides presentes no solo, o que faz a enzima ficar mais estável e menos vulnerável a degradação.

As enzimas do solo participam das reações metabólicas intercelulares, responsáveis pelo funcionamento e pela manutenção dos seres vivos e também desempenham papel fundamental atuando como catalisadoras de várias reações que resultam na decomposição de resíduos orgânicos (ligninases, celulasas, proteases, glucosidases, galactosidases), ciclagem de nutrientes (fosfatases, amidases, sulfatases), formação da matéria orgânica e da estrutura do solo (Mendes & Vivaldi, 2000). De acordo com Dick (1994), a atividade enzimática de um solo é o resultado do somatório da atividade enzimática dos organismos vivos (microorganismos, animais e plantas) e das enzimas associadas à fração não viva (enzimas abiônticas que se acumulam no solo protegidas da ação das proteases através da adsorção em partículas de argila e na matéria orgânica).

Dentre os fatores que influem na atividade enzimática do solo estão a concentração do substrato, o nível de umidade, a temperatura e o pH do solo (Silva et al., 1995; Arunachalan & Melkania, 1999). Normalmente valores de pH muito altos ou

muito baixos tendem a diminuir ou até mesmo inibir a atividade da enzima e muitas exigem um pH ideal para atingir sua atividade máxima, assim como outras funcionam bem numa determinada faixa de pH. Por isso, os ensaios para a determinação da atividade enzimática são realizados sob condições ajustadas para determinada enzima.

A atividade metabólica do solo também sofre uma forte influência da presença das raízes e materiais orgânicos em decomposição. Há uma intensa atividade microbiana na rizosfera, devido à existência de exsudatos e secreções radiculares que fornecem as maiores fontes de nutrientes prontamente disponíveis para os microorganismos (Grayston & Jones, 1996). Longe do alcance da zona de influência das raízes, o solo pode ser considerado pobre em fontes de carbono disponíveis (Rosado, 2000), o que diminui a atividade microbiana. A atividade biológica dos solos abrange todas as reações metabólicas celulares, suas interações e seus processos bioquímicos mediados ou conduzidos pelos organismos do solo.

De acordo com Dick & Tabatabai (1993), os microrganismos consistem nas fontes mais significativas de enzimas no solo, devido sua grande biomassa e alta atividade metabólica. Além disso, a produção e liberação de enzimas extracelulares são mais elevadas que a produção das plantas, já que os microrganismos têm um ciclo de vida curto com várias gerações.

Dentre os elementos importantes para sustentar o potencial produtivo das culturas agrícola no Cerrado, o fósforo (P) merece um destaque especial, pois além de apresentar baixo teor de P total e muito baixo teor de P disponível para as plantas (Goedert et al., 1986) o suprimento deste elemento no solo é dificultado pela baixa eficiência de aplicação dos fertilizantes fosfatados, já que as fontes solúveis de P adicionados ao solo normalmente podem ser adsorvidas ou convertidas a compostos de baixa solubilidade (Brady & Weil, 1996). A produção de enzimas, fosfatases e fitases, feita por certos microrganismos catalisam a hidrólise de ésteres e anidridos de  $H_3PO_4$  disponibilizando fontes inorgânicas de P para as plantas. Isso mostra que a contribuição dos microrganismos para fornecer este elemento para o solo, através de sua atividade enzimática, pode ser significativa. A biomassa microbiana não só imobiliza o P, formando um reservatório lábil deste nutriente, como também representa importante função nos processos de mineralização e solubilização deste elemento (Mendes & Reis Junior, 2003).

Segundo Mendes & Reis Junior (2003), apesar da ocorrência de vários microrganismos presentes no solo com capacidade para mineralizar e ou solubilizar o

fósforo, acontece dessa comunidade apresentar um número reduzido, quando comparado com outros organismos que estão na região rizosférica, o que diminui sua competição tornando insuficiente o P liberado por essa microbiota na intenção de promover reservas para o crescimento das plantas. De acordo com Aduan et al. (2004) a principal fonte de P, nos ecossistemas naturais, não vem da atividade microbiana, mas do intemperismo de minerais à base de fosfato de cálcio, já que no ciclo do fósforo não há um processo biológico tão eficiente e específico para suprir as reais necessidades de um habitat carente desse elemento, como é o caso da fixação biológica de nitrogênio. No entanto, a enzima fosfatase ácida tem sido muito estudada e pode acrescentar informações do potencial da mineralização de P orgânico de um solo (Dick et al., 1996).

A  $\beta$ -glicosidase é uma outra enzima de presença relevante nos solos que pode ser encontrada em plantas, animais e microrganismos, responsável por catalisar as reações de hidrólise da maltose e da celobiose, cujos produtos são importantes fontes de energia para os microrganismos do solo (Tabatabai, 1994).

Outras enzimas presente nos solos como a Arilsulfatase hidrolisam ligações do tipo éster de sulfato, liberando íons sulfato (Tabatabai & Bremner, 1970) tornando o enxofre (S) orgânico disponível às plantas pela mineralização da matéria orgânica (David et al., 1982), que entram em contato com suas raízes por meio do fluxo de massa, uma vez que a atividade enzimática ocorre sempre em solução (Dick & Tabatabai, 1993). Baligar et al. (1988) mostram que a atividade da arilsulfatase no solo decresce com a profundidade e com a diminuição do teor de matéria orgânica, pois há uma conseqüente redução na reserva de ésteres de sulfato que são substratos dessa enzima.

Neste sentido, é interessante refletir na forma como o solo vem sendo usado, pois alterações que venha a diminuir a microbiota do solo podem ocasionar prejuízo nas funções que os microrganismos exercem para beneficiar o desenvolvimento vegetal, como a disponibilidade de nutrientes essenciais.

Normalmente, sob condições ajustadas, a atividade de uma enzima do solo é avaliada analisando-se os produtos de suas reações (Moreira & Siqueira, 2002), pois é extremamente trabalhoso extrair uma enzima do solo.

De uma forma geral, a avaliação da atividade enzimática é muito importante para entender uma série de processos ocorridos no solo, inclusive para o conhecimento e o monitoramento das atividades poluidoras e degradadoras do solo (Margesin et al., 2000; Taylor et al., 2002).

Segundo Araújo & Monteiro (2007), a atividade enzimática do solo está inter-relacionada com a matéria orgânica, com as propriedades físicas e com a atividade e biomassa microbiana podendo funcionar como um bom indicador de mudanças na qualidade do solo e envolver metodologias simplificadas.

As análises de enzimas podem fornecer dados reprodutíveis de atividades de manejo sobre a comunidade microbiana (Bending et al., 2002) e ser muito útil na determinação da qualidade dos solos (Dick, 1994; Bergstrom & Monreal, 1998; Bandick & Dick, 1999; Mendes & Vivaldi, 2001). De acordo com Taylor et al. (2002), as análises das atividades da  $\beta$ -glicosidase, desidrogenase, urase, fosfatase e arilsulfatase podem ser utilizadas para avaliar o componente biológico do solo (atividade microbiológica do solo e mineralização de substratos), pois são enzimas catalisadoras de reações envolvidas nas transformações biogeoquímicas nos ciclos do carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S). Balota et al. (2004b) observaram significantes correlações entre a atividade enzimática (arilsulfatase, fosfatase, amilase e celulase) e o C e N microbiano de solos sob sistemas de manejo convencional, plantio direto e rotação de cultivos.

Um outro parâmetro é a atividade microbiológica total, que se trata de uma medida específica da atividade de proteases, lipases e esterases (atividade hidrolítica) que são capazes de hidrolisar o diacetato de fluoresceína (FDA). Esta atividade hidrolítica pode ser catalisada por bactérias, fungos, algas e protozoários, especialmente na superfície do solo (Barak & Chet, 1986; Ghini et al., 1998).

## **2.5 Sistemas de Cultivo do Solo**

### **2.5.1 Sistema de Plantio Convencional (SPC) X Sistema de Plantio Direto (SPD)**

Ainda é freqüente o uso do sistema de cultivo denominado convencional, que consiste na utilização demasiada de arados e grades no preparo do solo, especialmente a grade aradora, que diminui a estabilidade dos agregados e pode levar a sua destruição (Machado et al., 1981; Reinert et al., 1984).

A utilização intensiva de equipamentos em todas as operações agrícolas (semeadura, tratos culturais e colheita) tem promovido um expressivo aumento da compactação, principalmente na zona de desenvolvimento do sistema radicular da planta. O principal motivo desse fenômeno é a repetitividade das operações realizadas ao

longo dos anos (Oliveira, 2002).

Nas áreas de clima temperado e frio as técnicas baseadas na mobilização intensa e contínua do solo agrícola são quase sempre necessárias, mas foram importadas para as condições de clima tropical sem qualquer questionamento sobre a real necessidade dessas práticas.

Em solos sob vegetação natural, o balanço entre as adições e perdas de carbono leva a um estado de equilíbrio dinâmico, no qual praticamente não existe variação no teor de carbono orgânico com o tempo (Bayer & Mielniczuk, 1999). Porém, nas regiões tropicais, na conversão da vegetação natural em áreas agrícolas e florestais, geralmente há uma rápida perda de carbono orgânico do solo, em consequência da combinação entre altas temperaturas (calor) e umidade facilitando a decomposição. O constante revolvimento do solo pode contribuir para acelerar a oxidação do carbono orgânico (Castro Filho et al., 1991) e gerar perdas significativas na matéria orgânica do solo.

Um importante avanço para o processo agrícola brasileiro foi a introdução do sistema de plantio direto (SPD), a partir do início da década de 70 no Sul do país, surgindo como alternativa para combater a erosão por meio do controle do escoamento superficial da água da chuva utilizando restos culturais como barreira que reduz a velocidade da água de escoamento, facilitando a infiltração de água no solo. Estima-se que no Brasil, cerca de 2 a 2,5 bilhões de toneladas de solo são perdidas anualmente por causa da erosão hídrica (Correa, 2000).

Na década de 80 diversas pesquisas já mostravam que os benefícios deste sistema no solo podiam ser maiores. Dedecek et al. (1986) apontaram que a manutenção de uma vegetação de cobertura diminui tanto a erosividade da chuva quanto a enxurrada, reduzindo significativamente as perdas de solo e de água.

Oliveira et al. (2002) relata que o SPD reduz cerca de 75% as perdas de solo e 20% as perdas de água, em relação às áreas em que há o revolvimento do solo.

Contudo, é relevante salientar que a manutenção de uma cobertura do solo nos Cerrados é dificultada pelo clima, pois a seca é bastante prolongada e a palhada é rapidamente decomposta. Porém, esses resíduos quando satisfatoriamente permanecem na superfície do solo funcionam como fonte de energia (carbono) e nutrientes para a maioria das populações microbianas, podendo proporcionar um aumento na atividade biológica e intensificar as relações ecológicas (Powlson et al., 1987).

Um maior acúmulo de matéria orgânica na superfície do solo, como ocorre no SPD devido ao pouco revolvimento do solo e manutenção de uma cobertura vegetal, favorece temperaturas mais controladas, maior acúmulo de água, melhor agregação do solo e teores mais elevados de carbono orgânico, beneficiando o crescimento de microrganismos (Balota et al., 2004a). Balota et al. (1998) obtiveram, em sistema de plantio direto, acréscimos de 12% na matéria orgânica do solo em relação ao plantio convencional.

## **2.5.2 Sistemas Florestais**

Atualmente, segundo a Sociedade Brasileira de Silvicultura, cerca de 80% (4,8 milhões de hectares) das florestas plantadas brasileiras são de pinus e eucalipto. A região dos Cerrados passou a ter maior destaque no processo de reflorestamento, após a expansão acelerada da atividade florestal no Brasil, nas décadas de 1970 e 1980 (Juvenal & Mattos, 2002), devido às condições edafoclimáticas e fisiográficas da região serem favoráveis ao estabelecimento de plantios de eucalipto e pinus.

O corte raso de eucalipto para a extração da celulose ocorre com 7 anos e o desbaste de pinus com o mesmo intuito começa entre 9 e 10 anos; para a indústria moveleira, esses prazos se estendem com exigência mínima de 12 anos para o eucalipto e entre 15 e 18 anos para o pinus, para obtenção do bom aproveitamento da tora (Juvenal & Mattos, 2002).

É fato que o Brasil possui grandes benefícios econômicos vindos da exploração de florestas plantadas para a produção de celulose e papel, carvão, madeira serrada e painéis de madeira, empregando tecnologias avançadas de cultivo, manejo e exploração, além da curta rotação desses maciços (Juvenal & Mattos, 2002). Além disso, através de um fomento florestal, o setor industrial doa mudas para produtores se beneficiarem deste tipo de exploração, com o objetivo de estimular a expansão da atividade de plantio comercial de florestas, gerando renda para pequenos e médios produtores rurais, que podem consorciar o plantio de pinus e eucalipto com outros cultivos, utilizando áreas menos favoráveis à agricultura tradicional.

O crescimento dos movimentos sobre os impactos ambientais em todo o mundo atraiu enorme pressão para a atividade florestal, é considerado uma das grandes

causadoras do desequilíbrio ambiental, primeiro pela exploração das florestas tropicais, que estão associadas ao desmatamento, à extinção de espécies e ameaça aos povos das florestas; segundo pela preocupação de que os maciços florestais (como pinus e eucalipto) alteram significativamente as propriedades químicas, físicas e biológicas dos solos.

Contudo, os cientistas consideram que as florestas têm um efeito benéfico no sequestro de carbono, fixando-o durante seu crescimento e armazenando-o como constituinte de suas partes, diminuindo assim concentrações significativas de dióxido de carbono na atmosfera. Juvenal & Mattos (2002) afirmam que as florestas plantadas fixam mais eficientemente o carbono, pois são mantidas durante seu período de maior crescimento.

De fato, o plantio de florestas para reflorestamento evita a derrubada de florestas naturais, dado o seu elevado rendimento. Porém, a fauna dificilmente se adapta às novas condições impostas pelas florestas homogêneas, devido a pouca disponibilidade de alimentos e de locais para reprodução.

Por outro lado, o monocultivo de pinus proporciona um ambiente uniforme (com perda expressiva da biodiversidade local), modifica a diversidade de substrato para a biota do solo, alterando, por sua vez, alguns atributos biológicos, como, por exemplo, C-biomassa e respiração microbiana do solo, além de alterar a densidade e diversidade da fauna edáfica (Baretta et al., 2003). A intensificação do número de florestas de pinus tem provocado a atenção de pesquisadores em relação aos feitos da presença destes maciços e das modificações que podem ocorrer na estrutura física do solo e da paisagem como um todo (Rempel, 2000). Desta forma, são escassas as informações referentes às possíveis modificações que as plantações de pinus e eucalipto podem provocar nas propriedades microbiológicas dos solos, assim como se torna necessário saber a que ponto essas alterações e o estabelecimento desses monocultivos por vários anos podem prejudicar a qualidade desses solos.

No que diz respeito ao processo de introdução e adaptação de espécies, o cultivo do eucalipto e pinus na região do cerrado é uma invasão biológica, já que não fazem parte, naturalmente, deste ecossistema, mas que se naturalizam e passam a provocar mudanças no funcionamento do solo (Ziller, 2000).

Estudos realizados pela Universidade Federal do Espírito Santo e pela Federação de Órgãos para Assistência Social e Educacional (FASE) demonstraram que a

monocultura do eucalipto é altamente mecanizada em todas as suas fases e demanda pouca mão-de-obra nos locais onde está instalada.

### **2.5.3 Sistema de Integração Lavoura e Pecuária**

A integração lavoura-pecuária é uma estratégia promissora para desenvolver sistemas de produção menos intensivos no uso de insumos, e por sua vez, mais sustentáveis no tempo.

De acordo com Barcellos et al. (2000) estima-se que mais de 24 milhões de hectares de pastagens cultivadas encontram-se em algum estágio de degradação.

Os custos financeiros da formação, recuperação e reforma de pastagens são altos, por isso têm-se buscado diversas técnicas visando a diminuição dos mesmos. Entre estas técnicas, a utilização do consórcio de culturas com forrageiras tem sido aplicada não só na formação e reforma de pastagens, como também na produção de forragem para confinamento e cobertura morta para plantio direto de culturas. O consórcio lavoura e forrageira ainda pode atenuar os custos relativos à correção e adubação do solo e favorecer o controle de plantas daninhas (Souza Neto, 1993; Townsend et al., 2000; Cobucci, 2001).

A introdução de lavouras no sistema de integração lavoura e pecuária não é eventual, mas parte constante de um sistema de produção de grãos e de produção animal que interage e se completa biológica e economicamente quando bem manejado. Este sistema permite o uso mais racional de insumos, além de exigir, para implementar o sistema, máquinas e implementos agrícolas mais diversificados, mão-de-obra mais qualificada, domínio da tecnologia de lavouras anuais e pecuária e conhecimento mais aprimorados sobre o mercado agropecuário (Peixoto et al., 2001).

No Cerrado brasileiro tem-se pesquisado o sistema de integração agricultura-pecuária sob plantio direto, que consiste na implantação de cultivo consorciado de culturas anuais com espécies forrageiras permitindo que os restos culturais permaneçam na superfície do solo (Cobucci, 2001). De acordo com Oliveira (2001), nesse agroecossistema cultiva-se seqüencialmente um a dois monocultivos por ano, mais o cultivo de uma cultura safrinha, consistindo do consórcio de uma cultura precoce com a forrageira.

A integração de cultivos anuais com pastagens promove um manejo do solo

e da água mais sustentáveis nas regiões tropicais, pois reduz a abertura de novas áreas agrícolas e melhora a aptidão de áreas improdutivas ou degradadas. Além disso, o uso da pastagem em um sistema de rotação de culturas é muito benéfico para o solo aumentando a microporosidade, o que favorece a disponibilidade de água no sistema.

Contudo, um dos desafios da agricultura sustentável é o estabelecimento de sistemas de manejo do solo que mantenham suas propriedades químicas, físicas e biológicas favoráveis em longo prazo.

O declínio da produtividade das pastagens com o tempo constitui o maior obstáculo para o estabelecimento de uma pecuária bovina sustentável em termos agronômicos, econômicos e ambientais no Cerrado.

Segundo Anualpec (2000), as causas da degradação das pastagens estão associadas a baixa fertilidade do solo, a má formação inicial dos pastos, pisoteio do gado e ataque de pragas. Além disso, o queima dos pastos elimina o esterco e a matéria orgânica superficial do solo diminuindo a rebrota da forrageira e favorecendo a germinação de plantas daninhas.

O uso de sistemas integrados de culturas anuais e pastagens favorece o estabelecimento de agroecossistemas sustentáveis favorecendo benefícios no incremento da fertilidade do solo, aumento na atividade biológica com conseqüente maior eficiência na ciclagem de nutrientes e melhoria das propriedades físicas do solo, além de controlar doenças, pragas e plantas daninhas resultando em maior disponibilidade de alimento para o gado na época seca e melhor utilização de água e nutrientes ( Spain et al., 1996; Lopes et al., 1999).

## **2.6 Avaliação e Bioindicadores da Qualidade do Solo**

No início dos anos 90, o termo Qualidade do Solo passa a adquirir diversos conceitos e sua avaliação também ganha grande importância perante a sociedade. Larson & Pierce (1991) elaboraram uma definição onde já incluem a preocupação com a qualidade ambiental, mas Doran & Parkin (1994) sugerem um conceito mais complexo englobando a questão da sustentabilidade, de maneira que a capacidade do solo em exercer suas funções está relacionada diretamente com o sustento da produtividade biológica, conservação da qualidade ambiental e promoção da saúde humana, vegetal e animal.

Quanto melhor o entendimento a respeito da qualidade do solo, é possível

planejar seu bom funcionamento no presente sem este ser degradado no uso futuro. Através do monitoramento das mudanças na qualidade dos solos, pode-se especificar se um conjunto de práticas agrícolas é sustentável.

Quando um organismo reage de forma sensível diante da qualidade de seu ambiente, a nível bioquímico, fisiológico, morfológico ou comportamental, e isso pode ser medido infere-se o uso de uma bioindicação (Lima, 2000). Os microrganismos do solo vêm sendo considerados bons bioindicadores na avaliação de mudanças ocorridas no solo, principalmente pela ação antrópica, devido sua capacidade de detectar alterações num curto período de tempo, comparados com parâmetros químicos e físicos (Mendes & Reis Junior, 2004). Contudo, é imprescindível que se faça uma adaptação e aperfeiçoamento das técnicas de análises que representem indicadores biológicos da qualidade do solo para empregar com melhor proveito e confiabilidade.

Segundo Schmitz (2003) a qualidade do solo pode ser estimada pela observação ou medição de diferentes propriedades ou processos que ocorrem no solo dependendo da função do solo para a qual está sendo avaliado.

De forma geral os indicadores que servem para monitorar a qualidade do solo, tanto biológicos quanto químicos e físicos, apresentam alguns requisitos básicos para exercerem tal atribuição, como representar as propriedades ou funções do solo, serem sensíveis a variações em longo prazo no manejo e no clima, permitir sua medição aprimorada e precisa para diferentes tipos de solo e distintas condições edafoclimáticas e admitir que a determinação de suas análises possam ser feitas em grande número e de modo simples e com baixo custo (Doran & Parkin, 1994; Stenberg, 1999; Turco & Blume, 1999). Doran & Zeiss (2000) afirmam que a avaliação das características microbiológicas do solo normalmente se ajusta à maioria dos critérios de seleção de um indicador de qualidade do solo.

É importante mencionar que há uma falta de dados em relação aos indicadores biológicos para possibilitar uma padronização de faixas de valores ideais que sirvam de referência para auxiliar nas interpretações de um monitoramento da qualidade de um solo. Assim, este trabalho contribui na formação de um banco de dados com informações sobre os possíveis indicadores biológicos usados na avaliação da qualidade do solo.

Sendo assim, cada vez tornam-se mais freqüentes os estudos que avaliam parâmetros microbiológicos como indicadores sensíveis da qualidade de solos (Kennedy & Smith, 1995; Trasar-Cepeda et al., 1998; Wick et al., 1998; Deboz et al., 1999;

Rosado, 1999; Aon et al., 2001; Badiane et al., 2001; Chaer, 2001; Mendes & Vivaldi, 2001).

O conhecimento dos processos que ocorrem no solo é de extrema importância para a manutenção das funções que ele pode exercer (qualidade de um solo) a longo prazo. Do mesmo modo, o uso dos indicadores de qualidade do solo pode avaliar a distância em que os agroecossistemas encontram-se da sustentabilidade.

A avaliação da qualidade de um solo, para ter confiabilidade e consistência, exige um método sistemático para se determinar e interpretar as propriedades que possam exercer a função de indicador (Granatstein & Bezdicek, 1992). Contudo, ainda não se tem nenhum método isolado que atende as especificidades solo-planta para monitorar e avaliar eficientemente a qualidade do solo (Glover et al., 2000), já que suas propriedades são de difícil mensuração e envolvem a necessidade de se determinar referenciais devido aos vários tipos de solo existentes.

Definir, o mais claro possível, quais são as funções do solo que representam de uma forma geral o funcionamento do seu sistema e identificar os indicadores que se associem com cada função, amenizam a dificuldade de mensuração da qualidade desse sistema. Para isso, deve-se selecionar um conjunto mínimo de indicadores de qualidade para medir cada atributo químico, físico ou biológico que represente melhor cada função do solo (Doran & Parkin, 1994; Karlen & Stott, 1994; Larson & Pierce, 1994).

Os critérios para a seleção de indicadores relacionam-se, principalmente, com a sua utilidade em definir os processos do ecossistema (Araújo & Monteiro, 2007).

Diversos trabalhos científicos mostram que os indicadores biológicos são mais sensíveis que indicadores químicos e físicos para detectar, com mais antecedência, modificações que ocorrem no solo em função de seu manejo (Doran, 1980; Dick, 1994; Trasar-Cepeda et al., 1998).

Assim, a utilização de bioindicadores é importante para a realização de estudos visando a ampliação do conhecimento sobre os impactos de sistemas agrícolas no funcionamento dos processos microbiológicos dos solos e de suas conseqüências na manutenção, melhoria ou perda da qualidade destes solos, após sua incorporação ao processo produtivo, seja agrícola, pastoril, silvícola ou minerário, que interfere no equilíbrio e na dinâmica de qualquer ecossistema.

## **2.7 Qualidade Ambiental (Qualidade do Solo) – Uso sustentável dos Solos (Sistemas Sustentáveis)**

Com base em pesquisas arqueológicas, Olson (1981) relata que civilizações ancestrais deixaram de existir em razão da degradação ambiental e ecológica derivadas da exploração abusiva do solo. O manejo adequado dos solos, que melhora ou mantém as suas funções, tanto aumenta a produtividade das culturas como favorece a boa qualidade ambiental.

É significativa a atual preocupação com a qualidade ambiental servindo de base para a preservação da vida das futuras gerações. Isso é um fato que vem provocando consideráveis mudanças estruturais no meio rural e nas práticas adotadas para a produção agrícola, com a finalidade de diminuir os impactos que a agricultura traz para o meio ambiente. No entanto, ainda é impreciso definir a variação de atividades humanas que são potencialmente impactantes para o ambiente, por isso, embora seja uma preocupação necessária, o desenvolvimento de estudos para avaliar impactos no meio ambiente causados por atividade antrópica é um processo difícil.

É fato que a vegetação natural quando incorporada ao processo agrícola sofre um desequilíbrio, quase sempre irreversível, que ocasiona alterações nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo gerando um impacto ambiental. A proporção do impacto está diretamente relacionada com o manejo do sistema produtivo adotado, e por isso as práticas agrícolas que pretendem minimizar a degradação do solo e proporcionar maior sustentabilidade da agricultura têm recebido cada vez mais a atenção de pesquisadores e produtores (Balota et al., 1998). É claro que não se deve descartar que as alterações num solo onde antes havia vegetação nativa são feitas para comportar uma cultura com uma alta produtividade, mas a questão é manejar o solo ao longo do tempo mantendo ou aumentando esta produtividade sem esgotar os recursos que o solo pode oferecer.

Atualmente, a agricultura moderna tem demandado uma crescente necessidade de identificar parâmetros que estimem de modo eficiente e rápido as modificações que ocorrem no solo. A qualidade de um solo pode ser mensurada através do uso de indicadores que compreendem os atributos que reproduzem o status ambiental ou a condição de sustentabilidade que o solo se encontra (Araújo & Monteiro, 2007).

Apesar dos microrganismos terem a capacidade de dar respostas rápidas às modificações ocorridas no solo, os parâmetros biológicos sozinhos não são suficientemente eficazes para avaliarem a qualidade de um solo, contudo as informações geradas através dos atributos biológicos, físicos e químicos juntos podem vir a beneficiar

o planejamento e o desenvolvimento rural, podendo indicar se o solo está sendo bem ou mal manejado, além de proporcionar a identificação e caracterização de sistemas agrícolas sustentáveis com impactos negativos mínimos ao meio-ambiente.

A utilização de sistemas sustentáveis na agricultura é de suma importância, pois contribui para manter o equilíbrio entre os fatores de formação do solo e aqueles que provocam a sua degradação, e que evitaria, ou pelo menos diminuiria, a queda de produtividade e a deterioração do ecossistema.

Dentro deste contexto, surge o objetivo da agricultura sustentável que é o manejo e utilização dos ecossistemas agrícolas mantendo sua diversidade biológica, capacidade de regeneração, que venha proporcionar, no presente e no futuro, significativas funções ecológicas, econômicas e sociais sem ameaçar outros ecossistemas (Lanna, 2002). Deste modo, a alta produtividade agrícola deve ser conciliada com padrões elevados de qualidade do meio ambiente (Rodrigues et al., 2002). Sistemas de produção agrícola sustentáveis fundamentam-se em rotações de culturas, restos culturais de lavouras, esterco animal, adubação verde e utilização de técnicas que maximizem a atividade biológica pelo incremento de matéria orgânica no solo.

Um bom exemplo e muito difundido atualmente, apesar de ser uma prática já antiga, de sistema sustentável é o plantio direto que, quando bem manejado, além de revolver pouco o solo, quando comparado ao plantio convencional, também o conserva coberto por resíduos culturais, protegendo os agregados dos solos contra a força do impacto das gotas de chuva, aumenta a infiltração de água, possibilita diminuição do escoamento superficial e mantém os teores de matéria orgânica, permitindo o bom desenvolvimento das culturas (Albuquerque et al., 1995).

De acordo com Kluthcouski & Aidar (2003) na integração lavoura e pecuária há uma reciprocidade em que os cultivos anuais repõem nutrientes no solo enquanto que as forrageiras reciclam os nutrientes do subsolo, restituem a matéria orgânica e promovem a aeração biológica, através de suas raízes abundantes, melhorando as propriedades físicas do solo.

Um sistema agrícola é sustentável somente quando a terra é utilizada em conformidade com sua capacidade (Schoenholtz et al., 2000), sendo assim a necessidade de avaliar as propriedades do solo relacionando à sustentabilidade das funções dos agroecossistemas tem uma relação direta com o aumento do interesse dos pesquisadores e agricultores em estabelecer os efeitos das práticas de manejo sobre a qualidade de um solo.

Atualmente, a agricultura moderna tem demandado uma crescente necessidade de identificar parâmetros que estimem, de modo eficiente e rápido, as modificações que ocorrem no solo. A qualidade de um solo pode ser mensurada através do uso de indicadores que compreendem os atributos que reproduzem o status ambiental ou a condição de sustentabilidade que o solo se encontra (Araújo & Monteiro, 2007).

Um dos desafios atuais da pesquisa é como avaliar a qualidade de um solo, de modo simples e confiável.

A qualidade do solo pode ser avaliada através da quantificação de alguns indicadores ou atributos de propriedades físicas, químicas e biológicas que tornem possível o monitoramento de mudanças no estado de qualidade de solo visando separar a condição sustentável da não sustentável (Goedert, 2005).

A proposta de utilizar os atributos do solo como indicadores de qualidade é mostrar claramente se há perdas em suas funções num sistema e detectar uma possível degradação antes que torne um processo irreversível.

## **2.8 Ferramenta Computacional para avaliar a qualidade de solos**

No Departamento de Microbiologia da Universidade Federal de Viçosa, em defesa de tese (Chaer, 2001), foram propostos modelos que permitem estimar os índices de qualidade do solo sob as mais variadas condições de solo e de manejo florestal. Com modelos bem ajustados, pode-se “quantificar a qualidade”, criando uma ferramenta extremamente útil para apontar a direção que a sustentabilidade está progredindo. Além disso, esses modelos possibilitam indicar se determinada prática de manejo é ambientalmente conveniente ou benéfica.

A partir disso, utilizou-se um software, o Sistema de Monitoramento da Qualidade do Solo ou SIMOQS, desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa, em que o usuário, tendo em mãos um conjunto de dados obtidos a partir da análise de características físicas, químicas e biológicas, escolhe um modelo ajustado aos seus propósitos, adequando o modelo escolhido aos dados disponíveis (Chaer et al., 2004). A construção desses modelos envolve pesos numéricos associados às funções e indicadores de qualidade do solo e então é calculado um Índice de Qualidade de Solo (IQS).

É muito importante que os atributos do solo sejam correlacionados um com o outro e de forma integrada com os indicadores que representem melhor as funções na qualidade de um solo, de forma que os efeitos dos atributos selecionados (quantificados pelos seus respectivos indicadores) sejam expressos pelo IQS (Burger & Kelting, 1999).

De acordo com Chaer et al. (2004) o SIMOQS tem como características a possibilidade de trabalhar em rede; modelos específicos para situações diferenciadas (cultura/solo); determinação da contribuição do uso do solo e da prática de manejo adotada para a qualidade e sustentabilidade do solo; flexibilidade para o uso de diferentes indicadores de qualidade e organização de bancos de dados dos indicadores de qualidade.

Diante da importante necessidade de se avaliar a qualidade do solo, para se obter conhecimentos que proporcione planejar o uso adequado dos recursos que o solo pode oferecer, torna-se essencial à aplicação de ferramentas como o SIMOQS que integra as propriedades físicas, químicas e biológicas possibilitando monitorar as mudanças ocorridas num solo ao longo do tempo pelo uso de diferentes sistemas de produção. Neste sentido que este trabalho contribui para acrescentar mais informações sobre a aplicação do uso do SIMOQS para avaliar a qualidade de solos e também para gerar mais informações sobre os efeitos dos diferentes sistemas produtivos adotados nos solos de Cerrado.

O SIMOQS tem como potenciais aplicações (Tótola & Chaer, 2002):

- Acompanhar as tendências e mudanças na qualidade do solo devido às práticas de manejo;
- Identificar áreas onde a qualidade do solo (QS) possa estar mais comprometida, possibilitando ações preventivas e de controle;
- Monitoramento de procedimentos de biorremediação de solos contaminados;
- Monitoramento da recuperação de solos degradados;
- Utilizar o IQS como um referencial a mais para valoração da terra.

É também importante considerar que o solo constitui um ambiente complexo e em constante fluxo (de natureza heterogênea) tornando difícil a avaliação da qualidade deste sistema, pois ocasiona uma grande subjetividade nos modelos propostos para este

fim. Além disso, a capacidade do solo de desenvolver suas funções está direta ou indiretamente ligada, e em graus de importância diferenciadas, à qualidade apresentada pelos atributos químicos, físicos e biológicos simultaneamente.

Os indicadores de qualidade do solo são substitutos mensuráveis dos seus atributos (Burger & Kelting, 1999), pois estes não podem ser medidos diretamente, daí a importância da mais adequada seleção possível dos indicadores para refletirem os atributos do solo nas determinadas funções de qualidade.

Não há condições de avaliar a qualidade do solo utilizando um indicador individualmente, pois não descreve nem quantifica todos os aspectos que envolvam as funções que um solo pode exercer (Stenberg, 1999). Além disso, os indicadores quando selecionados devem ser quantificados localmente para gerar especificidade, por exemplo, entre o solo e a cultura estabelecida.

É importante frisar que os indicadores fornecem apenas uma estimativa de Qualidade do Solo, já que uma tarefa difícil, na avaliação desse sistema, é saber quando é que os valores obtidos indicam condições adequadas de uso do solo. De acordo com Santana & Bahia Filho (1999) para cada indicador utilizado é necessário estabelecer um limite de sustentabilidade para separar a condição sustentável da não sustentável.

De acordo com Tólola & Chaer (2002) a qualidade “ideal” para um solo não é bem conhecida, diferindo entre os vários tipos de solo e para cada cultura que está ou será estabelecida. Por isso, existe a necessidade de determinar referenciais que possam servir de base para a interpretação e comparação da Qualidade do Solo.

O estudo da Qualidade do Solo implica na necessidade da avaliação de um grande número de características, enorme volume de dados, o que como consequência também aumenta a dificuldade de interpretação. Diante disso, é fundamental conhecer quais mudanças são causadas por determinada prática e como essas mudanças afetam a produtividade, assim como saber que mudanças positivas e negativas ocorrem simultaneamente e isso que vai gerar uma mudança líquida na Qualidade do Solo que pode ser melhor, pior ou invariável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADUAN, R.E.; VILELA, M.F. & REIS JUNIOR, F.B. dos. **Os grandes ciclos biogeoquímicos do planeta**. Embrapa Cerrados. Planaltina-DF. 25p (Documentos, n.119), 2004.

ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J.; FIORIN, J.E.; RUEDELL, J. & PETRENE, C.; FORTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeitos sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista bras. Ci. Solo**, 19:119-155,1995.

ALMEIDA JR de, J. M. **Uma proposta de ecologia humana para o Cerrado**. In: PINTO, M.N. (Org.). Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas. Brasília: Editora Universidade de Brasília, p.545-559,1990.

ANDERSON, J.P.E. & DOMSCH, K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 10, n. 3, p. 215-221, 1978.

AON, M.A.; CABELLO, M.N.; SARENA, D.E.; COLANERI, A.C.; FRANCO, M.G.; BURGOS, J.L. & CORTASSA, S.I. Spatio-temporal patterns of soil microbial and enzymatic activities in an agricultural soil. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 18, n. 3, p. 239-254, 2001.

ARAUJO, A.S.F. & MONTEIRO, R.T.R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 23, n. 3, p. 66-75, 2007.

ARUNACHALAN, A. & MELKANIA, N.P. Influence of soil properties on microbial populations, activity and biomass in humid subtropical mountains ecosystems of India. **Soil Bio. Biochem.**, 30:217-223, 1999.

AYARZA, M.A.; VILELA, L.; PIZARRO, E. A. & COSTA, P.H. **Sistemas Agropastoriles basados en leguminosas de uso multiples**. In: GUIMARÃES, E.P.; SANZ, J.I.; RAO, I.M.; AMEZQUITA, M.C.; AMEZQUITA, E. (Eds) *Sistemas Agropastoriles en Sabanas Tropicales de América Latina*. Centro de Agricultura Tropical & Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasília, DF. pp 175-194, 1999.

BADIANE, N.N.Y.; CHOTTE, J.L.; PATE, E.; MASSE, D. & ROULAND, C. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 18, n. 3, p. 229-238, 2001.

BALIGAR, V.C.; WRIGHT, R.J. & SMEDLEY, M.D. Enzyme activities in hill land soils of the Appalachian region. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:367-384, 1988.

BALOTA, E.L.; COLOZZI FILHO, A.; ANDRADE, D.S. & HUNGRIA, M. Biomassa microbiana e sua atividade em solo sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Viçosa-MG, v. 22, p.641-649, 1998.

BALOTA, E.L.; COLOZZI FILHO, A.; ANDRADE, D.S. & DICK, R.P. Long-term and crop rotation effect on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**, 77: 137-145, 2004a.

BALOTA E. L.; KANASHIRO, M.; COLOZZI FILHO, A.; ANDRADE, D. S. & DICK, R. P. Soil enzyme activities under long-term tillage and crop rotation systems in subtropical agro-ecosystems. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 35, p. 300-306, 2004b.

BANDICK, A.K. & DICK, R.P. Field management effects on soil enzyme activities. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 31, n. 11, p. 1471-1479, 1999.

BARAK, R. & CHET, I. Determination, by fluorescein diacetate staining, of fungal viability during mycoparasitism. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.18, n.3, p 315-319, 1986.

BARCELLOS, A.O; ANDRADE, R.P.; KARIA, C.T. & VILELA, L. Potencial e uso de leguminosas forrageiras dos gêneros *Stylosanthes*, *Arachis* e *Leucena*. In: PEIXOTO, A.M.; PEREIRA, C.G.S.; MOURA, J.C. de; FARIA, V.P. de (eds). **ANAIS do 17 Simposio sobre manejo da pastagem**, Piracicaba-SP, FEALQ, p. 297-357, 2000.

BARETTA, D.; SANTOS, J.C.P.; MANFROI, A.F.; TASCA, F.A.; DOMINGOS, M.D.; KLAUBERG-FILHO, O. & MAFRA, A.L. **Diversidade da fauna edáfica em mata nativa, floresta de pinus e campo nativo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003. Resumos expandidos. Ribeirão Preto, SBCS/UNESP, 2003. p.1-4. CD ROM.

BAYER, C. & MIELNICZUK, J. **Dinâmica e função da matéria orgânica**. In: SANTOS, G. de A.; CAMARGO, F. A. de O. (Eds.). Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Gênese, cap. 2, p. 9-26, 1999.

BENDING, G.D.; TURNER, M.K. & JONES, J.E. Interactions between crop residue and soil organic matter quality and the functional diversity of soil microbial communities. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.34, n.9, p 1073-1082, 2002.

BERGSTROM, D.W. & MONREAL, C.M. Increased soil enzyme activities under two row crops. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, n. 5, p. 1295-1302. 1998.

BRADY, N.C. & WEIL, R.R. The nature properties of soils. 11 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

BURGER, J.A.; & KELTING, D.L. Using soil quality indicators to assess forest stand management. **For Ecol. Manage.**, 122: 155-166, 1999.

BURNS, R.G. Interactions of enzymes with soil mineral and organic colloids. In: HUANG, P.M.; SCHNITZER, M. Interactions of soils minerals with natural organics and microbes. Madison. **Soil Science Society of America**, p. 429-451. 1986.

CAMPOS, D.C. **Influência da mudança do uso da terra sobre a matéria orgânica no município de São Pedro-SP.** Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Piracicaba. 83 p. (Tese de Mestrado), 1998.

CANTARELLA, H.; ABREU, C.A. & BERTON, R.S. **Fornecimentos de nutrientes pela matéria orgânica no solo.** In: GUERINI, I.A. (Ed.). Anais... Encontro sobre matéria orgânica do solo – problemas e soluções, p. 63-121. 1992

CARVALHO, F. **Atributos bioquímicos como indicadores da qualidade de solo em florestas de Araucaria angustifolia (Bert.) O. Ktze. no Estado de São Paulo.** Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Piracicaba. 79 p. (Tese de Mestrado), 2005.

CASTRO FILHO, C.; VIEIRA, M. J. & CASÃO JUNIOR, R. Tillage methods and soil and waterconservation in southern Brazil. **Soil Tillage**, Amsterdam, v. 20, p. 271-283, 1991.

CATTELAN, A.J. & VIDOR, C. Flutuações na biomassa, atividade e população do solo, em função de variações ambientais. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 14, p. 133-142. 1990.

CERRI, C.C.; VOLKOFF, B. & EDUARDO, B.P. Efeito do desmatamento sobre a biomassa microbiana em Latossolo Amarelo da Amazônia. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 9, n. 1, p. 1-4. 1985.

CHAER, G.M. **Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos.** Viçosa/Departamento de Microbiologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2001. (tese de Mestrado)

CHAER, G.M.; TÓTOLA, M.R.; LOBATO, M.C.C. & Di LORIO, V.O. **SIMOQS – Sistema de Monitoramento da Qualidade do Solo.** Manual do Usuário. Versão 1.0 – 2004.

COBUCCI, T. **Manejo integrado de plantas daninhas em sistema de plantio direto.**  
In: ZAMBOLIM, L. Manejo Integrado Fitossanidade: cultivo protegido, pivô central e plantio direto. Viçosa: UFV, 2001. p. 583-624.

CORREA, A. Prejuízos com perdas de solos nas áreas agrícolas. Embrapa Solos-Coluna do Conservacionismo. Disponível em: [http://www.cnps.embrapa.br/scarch/plancts/coluna14/coluna 14.html](http://www.cnps.embrapa.br/scarch/plancts/coluna14/coluna%2014.html).

CORREIA, M.E.F. & ANDRADE, A.G. Formação da serrapilheira e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais.** Porto Alegre: Gênese, p. 197-225. 1999.

DAVID, M.B.; MITCHELL, M.J. & NAKAS, J.P. Organic and inorganic sulfur constituents of a forest soil and their relationship to microbial activity. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 46:847-852, 1982.

D' ANDRÉA, A.F.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; SIQUEIRA, J.O. & CARNEIRO, M.A.C. Atributos biológicos indicadores de qualidade do solo em sistemas de manejo na região do cerrado do sul do estado de Goiás. **R. Bras. Ci. Solo**, 26: 913-923, 2002.

DEBOSZ, K.; RASMUNSEN, P.H. & PEDERSEN, A.R. Temporal variations in microbial biomass C and celullolytic enzyme activity in arable soils: effects of organic matter input. **Applied Soil Ecology**, v. 13, n. 3, p. 209-218, 1999.

DEDECEK, R.A.; RESCK, D.V.S. & FREITAS, E. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em Latossolo Vermelho-escuro dos Cerrados em diferentes cultivos sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 10 p. 265-272, 1986.

DIAS, L.E. & GRIFFITH, J.J. **Conceituação e caracterização de áreas degradadas.**  
In: DIAS, L.E. & MELLO, J.W.V. (Eds.). Recuperação de áreas degradadas. 1º ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1998.

DICK, R.P. Soil enzymes activities as indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., ed. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison: **Soil Science Society of America** (Special Publication number,35), 1994. p 107-124.

DICK, R.P.;BREACKWELL, D.P. & TURCO, R.F. **Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators.** In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds) Methods for assessing soil quality. Madison: SSSA, p. 247-271. 1996 (SSSA Special Publication, 49).

DICK, R.P. **Soil enzymes activities as integrative indicator of soil health.** In: PANKHURST C.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R. (Org) Biological indicators of soil health. New York: CAB, p. 121-155, 1997.

DICK, W.A. & TABATABAI, M.A. **Significance and potential uses of soil enzymes.** In: METTING JUNIOR, F. B. (eds). Soil microbial ecology applications in agricultural and environmental management. New York: Marcel Dekker, p. 95-127, 1993.

DORAN, J.W. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. **Soil Science Society of America journal**, Madison, v.44, p 765-771, 1980.

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

DORAN, J.W. & ZEISS, M.R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 15, n.1, p. 3-11, 2000.

FAUCI, M.F. & DICK, R.P. Microbial biomass as an indicator of soil quality: effects of long-term management and recent soil amendments. In: DORAN, J.W. et al. (eds) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA: ASA, p. 229-234. 1994 (SSSA Special Publication, 35).

FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O. & VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 991-996, 1999.

FLIE\_BACH, A. & MÄDER, P. Carbon source utilization by microbial communities in soils under organic and conventional farming practice. In: INSAN, H.; RANGGER, A., ed. **Microbial Communities – Functional versus structural approaches**. Berlin: Springer-Verlag, p. 109-120, 1997.

GAMA-RODRIGUES, E.F. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A. de O. (Eds) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, p.227-243. 1999.

GAMA-RODRIGUES, E.F. & DE POLLI, H. **Biomassa na ciclagem de nutrientes**. In: Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, 24º Reunião Brasileira sobre micorrizas, 8º Simpósio Brasileiro de Microbiologia do solo, 6º Reunião Brasileira de Biologia do solo, 3. Santa Maria, Anais... Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Sociedade Brasileira de Microbiologia, 2000. CD-ROM

GHINI, R.; MENDES, M.D.L. & BETTIOL, W. Método de hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) como indicador de atividade microbiana no solo e supressividade a *Rhizoctonia solani*. **Summa Phytopathologica**, v.24, N.3/4, 1998. p 239-242.

GLOVER, J.D.; REGANOLD, J.P. & ANDREWS, P.K. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic and integrated apple orchards in Washington State. **Agric. Ecosys. Environ.**, 80: 29-45. 2000.

GOEDERT, W.J. **Qualidade do solo em Sistemas de Produção Agrícola**. In: XXX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo – Solos, Sustentabilidade e Qualidade Ambiental. Recife – PE, 2005. p 1-10.

GOEDERT, W.J. Uso e manejo dos recursos naturais do Cerrado: solo e clima. In. **ANAIS SIMPOSIO SOBRE O CERRADO**, 5., 1979, Brasília. Cerrado: uso e manejo. Brasília: Editerra, p. 475-498, 1980.

GOEDERT, W.J.; SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E. Fósforo. In: GOEDERT, W.J. (Ed.). **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. Planaltina: Embrapa – CPAC; São Paulo: Nobel, p. 129-163. 1986.

GRANATSTEIN, D. & BEZDICEK, D.F. The need for a soil quality index: local na regional perspectives. **Am. J. Altern. Agric.**, 7:12-16, 1992.

GRAYSTON, S.J. & JONES, D.V.D. Rhizosphere carbon flow in trees, in comparison with na annual plant: the importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.5, n. 1. p. 29-56, 1996.

GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R.; ANGERS, D.A.; MONREAL, C.M. & ELLERT, B.H. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 74, n.4, p. 367-385. 1994.

HUNGRIA, M. & ARAÚJO, R.S. **Manual de métodos empregados em estudos de Microbiologia Agrícola**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; Centro Nacional de Pesquisa Arroz e Feijão, Centro Nacional de Pesquisa de Soja. In: WARDLE, D.A. Metodologia para quantificação da biomassa microbiana do solo, cáp.21, Brasília, D.F, pp 419-436, 1994.

JENKINSON, D.S. & POWLSON, D.S. The effect of biocidal treatments on metabolism in soil. V. A method of measuring soil biomass. **Soil Biol. & Biochem.** v 8, pp 209-213, 1976a.

JENKINSON, D.S. & POWLSON, D.S. The effect of biocidal treatments on metabolism in soil. I. Fumigation with chloroform. **Soil Biol. & Biochem.** v 8, pp 167-177, 1976b.

JENKINSON, D.S. & LADD, J.N. Microbial biomass in soils: measurement and turnover. In: PAUL, E.A. & LADD, J.N. (Eds) **Soil Biochemistry**. Vol.5. 1<sup>st</sup> ed. Dekker, New York. pp 415-471, 1981.

JUVENAL, T.L. & MATTOS, R.L.G. **O setor florestal no Brasil e a importância do reflorestamento**. Setor Florestal. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 16, p. 3-30, 2002.

KARLEN, D.L. & STOTT, D.E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, **Soil Science Society of American**, p.53-72, 1994. (Special Publication, 35).

KENNEDY, A. & DORAN, J. Sustainable agriculture: role of microorganisms. In: BITTON, G. (Org.) **Encyclopedia of Environmental Microbiology**. New York: John Wiley & Sons, p. 3116-3126, 2002.

KENNEDY, A. C. & SMITH, K.L. Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils. **Plant and Soil**. The Hague, v. 170, n. 1, p. 75-86, 1995.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, C.F. & AIDAR, H. Integração lavoura-pecuária. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. 570p.

LAL, R.L. **Métodos para avaliação do uso sustentável dos recursos solo e água nos trópicos**; tradução e adaptação de MEDUGNO, C.C. & DYNIA, J.F. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1999. 97 p. (Embrapa Meio Ambiente – Documentos, 03)

LANNA, A.C. **Impacto Ambiental de Tecnologias, Indicadores de Sustentabilidade e Metodologias de Aferição: Uma Revisão.** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2002. p 31 (documentos/Embrapa Arroz e Feijão, 144).

LARSON, W.E. & PIERCE, F.J. Conservation and enhancement of soil quality. In: proceedings of the International Workshop on Evaluation for sustainable land management in the developing world. International board for soil research and management, IBSRAM Proceedings, vol. 2, n.12. 1991.

LARSON, W.E. & PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, **Soil Science Society of American**, p.37-52, 1994. (Special Publication, 35).

LIMA, J. S. O Biomonitoramento como ferramenta complementar na avaliação de impactos ambientais – Discutindo conceitos. **Tec Hoje**, Salvador, Jun, 2000. Disponível em:<[http://www.ietec.com.br:8080/ietec/techoje/materias\\_tec/meioambiente/tecnologias/dtml\\_materia\\_materia?id=http://www.ietec.com.br:8080/ietec/techoje/techoje/meioambiente/2003/01/24/2003\\_01\\_24\\_0007.2xt](http://www.ietec.com.br:8080/ietec/techoje/materias_tec/meioambiente/tecnologias/dtml_materia_materia?id=http://www.ietec.com.br:8080/ietec/techoje/techoje/meioambiente/2003/01/24/2003_01_24_0007.2xt)>. Acesso em: 25 nov. 2006.

LOPES, A.; AYARZA, M.A.; THOMAS,R. **Sistemas Agropastoriles en las Sabanas se América Latina Tropical: Licciones del desarrollo agrícola de los Cerrados de Brasil.** In: QUIMARÃES, E.P.; SANZ,J.I.; RAO,I.M.; AMEZQUITA,M.C.; AMEZQUITA,E. (Eds) Sistemas Agropastoriles en Sabanas Tropicales de America Latina. 1<sup>st</sup> ed. Centro de Agricultura Tropical & Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasília, DF. pp 9-30, 1999.

MACHADO, J.A.; SOUZA, D.M.P. & BRUM, A.C.R. Efeito de anos de cultivo convencional em propriedades físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.5, n.3, p.181-189, set./dez. 1981.

MARCHIORI JÚNIOR, M. & MELO, W.J. Alterações na MO e na biomassa microbiana em solo de mata natural submetido a diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, nº 6, pp 1177-1182, 2000.

MARGESIN, R.; ZIMMERBAUER, A. & SCHINNER, F. Monitoring of bioremediation by soil biological activities. **Chemosphere**, 40:339-346, 2000.

MARTENS, R. Current methods for measuring microbial biomass C in soil: potentials and limitations. **Biol. Fertil. Soils**, Berlin, v. 19, p. 87-99, 1995.

MELE, P.M. & CARTER, M.R. Effect of climatic factors on the use of microbial biomass as an indicator of changes in soil organic matter. In: MULONGOY, K.; MERCKX, R. (Eds) **Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture**. New York: John Wiley & Sons, p. 57-64. 1993.

MELERO, S.; PORRAS, J. C. R.; HERENCIA, J. F. & MADEJON, E. Chemical and biochemical properties in a silty loam soil under conventional and organic management. **Soil and Tillage Research**, Londres, v. 90, p. 162-170, 2005.

MENDES, I.C. Universo paralelo. **Panorama Rural**, São Paulo, pp 42-47, 2003.

MENDES, I.C. **Impactos de Sistemas Agropecuários na atividade enzimática e biomassa microbiana dos solos de Cerrado**. In: II Congresso Brasileiro de Soja/ Mercosoja, Londrina-PR, Embrapa Soja, p 246-257, 2002. ( documentos, 180)

MENDES, I.C. & REIS JUNIOR, F.B. **Microrganismos e disponibilidade de fósforo (P) nos solos: uma análise crítica**. Embrapa Cerrados – Planaltina –DF, 26p. 2004 (Documentos, 85).

MENDES, I.C. & VIVALDI, L. **Propriedades microbiológicas de solos do bioma cerrado sob vegetação nativa**. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 24. REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 8. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO. 6. REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 3., Santa Maria. Anais. Santa Maria, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo/Sociedade Brasileira de Microbiologia, 2000. CD-ROM

MENDES, I.C. & VIVALDI, L.A. **Dinâmica da biomassa e atividade microbiana em uma área sob mata de galeria na região do Distrito Federal.** In: RIBEIRO, J.F.; FONSECA, C.E.L.; SOUZA-SILVA, J.C. (Eds). Cerrado: caracterização e recuperação de matas de galeria. Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 665-687, 2001.

MOREIRA, F.M.S. & SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e Bioquímica do solo.** Lavras: UFLA, 625p. 2002.

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.; CANTARUTTI, R.B. & BARROS, N.F. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: ALVAREZ, V.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M., eds. Tópicos em ciência do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2, p. 393-486, 2002.

OLIVEIRA, G.C. **Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de manejo por 20 anos no cerrado.** Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2002. 78p. (Tese de Doutorado)

OLIVEIRA, I. P. Palhada no Sistema Santa Fé. Goiânia: EMBRAPA-CNPAF, 2001. 4 p. (Informações Agronômicas, 93)

OLSON, G.W. Archaeology: lessons on future soil use. *J. Soil Water Conserv.*, 36:261-264. 1981.

OSENBERG, C. W & SCHMITT, R. J. Detecting ecological impacts caused by human activities. In: SCHMITT, R. J.; OSENBERG, C. W. **Detecting ecological impacts: Concepts and applications in coastal habitats.** New York: Academic Press, p. 3-16. 1995.

PEIXOTO, A.M.; MOURA de J.C.; SILVA da S.C. & FARIA de V.P. **Planejamento de Sistemas de Produção em pastagens.** In: MACEDO, M.C.M. Integração lavoura e pecuária: alternativa para sustentabilidade da produção animal. Anais do 18º Simpósio sobre Manejo da Pastagem. Piracicaba: FEALQ. pp 257-281, 2001.

POWLSON, D.S. **The soil microbial biomass: before, beyond and back**. In: RITS, K.; DIGHTON, J & GILLER, K.E. Beyond the biomass. BSSS, Wiley-Sayce, 1994.

POWLSON, D. S., BROOKES, P.C. & CHRISTENSEN, B.J. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw decomposition. **Soil Biology and Biochemistry**. 19 (2): 159-164. 1987.

RAMALHO FILHO, A. & BEEK, K.J. **Sistema da avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3 ed. Rio de Janeiro: Embrapa – CNPS. 1994. 65 p.

REMPEL, C. **Aplicação do sensoriamento remoto para determinação da evolução da mata nativa da Bacia Hidrográfica do rio Forqueta - RS, entre 1985 e 1995**. Dissertação de Mestrado. CEPSSRM - UFRGS - 2000. 70p.

REINERT, D.J.; MUTTI, L.S.M.; ZAGO, A.; AZOLIN, M.A.D. & HOFFMANN, C.L. Efeito de diferentes métodos de preparo do solo sobre a estabilidade de agregados em solo Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v.14, p.19-25, 1984.

RIBEIRO, J. F. & WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de. (ed). **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, p. 89-166, 1998.

RICE, C.W.; MOORMAN, T.B. & BEARE, M. **Role of microbial biomass carbon and nitrogen in soil quality**. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds) Methods for assessing soil quality. Madison: SSSA, p. 203-215. 1996 (SSSA Special Publications, 39).

RODRIGUES, G.S.; CAMPANHOLA, C. & KITAMURA, P.C. Avaliação de impacto ambiental da inovação tecnológica agropecuária: um sistema de avaliação para o controle institucional de P&D. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, Brasília, v.19, n.3, p 349-375, 2002.

ROSADO, A.S. **Diversidade microbiana e qualidade do solo.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIAS DO SOLO, 28, Brasília. Resumos expandidos... Rio de Janeiro: SBCS, 1999. CD-ROM

ROSADO, A.S. **Diversidade e ecologia de microrganismos do solo.** In: REUNIAO BRASILEIRA DE FERTILIDADE E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 23; REUNIAO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 7; SIMPOSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 5; REUNIAO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 2, 2000, Santa Maria. Anais... Santa Maria: UFSM, 2000. CD-ROM.

ROSCOE, R.; MERCANTE, F.M. & SALTON, J.C. **Dinâmica da matéria orgânica do solo. Modelagem matemática e métodos auxiliares.** Dourados, MG. Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. 304p.

ROSS, D.J. Estimation of soil biomass C by a fumigation-extraction method: influence of seasons, soils and calibration with the fumigation-incubation procedure. **Soil Biol. Biochem.**, 22: 295-300, 1990.

SANO, E.E.; BARCELLOS, A. de O. & BEZERRA, H.S. **Área e distribuição espacial de Pastagens cultivadas no Cerrado Brasileiro.** Boletim de pesquisa – Embrapa Cerrados, Planaltina, DF. nº 3, p 6-8, 1999.

SANTANA, D.F. & BAHIA-FILHO, A.F.C. **Indicadores de qualidade do solo.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIAS DO SOLO, 28, Resumos expandidos... Rio de Janeiro: SBCS, 1999. CD-ROM.

SCHMITZ, J.A.K. Indicadores biológicos de qualidade do solo. UFRGS. Faculdade de Agronomia. Porto Alegre, RS. Tese de doutorado. 233p. 2003.

SCHOENHOLTZ, S.H.; VAN MIEGROET, H. & BURGER, J.A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.138, n.1/3, p 335-356, 2000.

SCHNÜRER, J. & ROSWALL, T. Fluorescein Diacetate Hydrolysis as a Measure of Total Microbial Activity in Soil and Litter. **Applied and Environmental Microbiology**. vol.43, nº 6, pp 1256-1261, 1982.

SILVA, T.; MELO, W.J.; TEIXEIRA, S.T.; LEITE, S.A.S. & CHELI, R.A. **Efeito do lodo de esgoto contaminado com doses crescente de crômio sobre a atividade enzimática do solo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 15., Viçosa, 1995. Anais. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.2325-2330, 1995.

SILVA, J.E. da & RESK, D.V.S. Matéria orgânica do solo. In: VARGAS, M.A.T. & HUNGRIA, M. **Biologia dos solos dos cerrados**. Embrapa Cerrados. Planaltina-DF, 1997. 524p.

SILVA, J.E.; LEMAINSKI, J. & RESK, D.V.S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região dos cerrados do oeste baiano. **Revista Brasileira de Ciências do solo**, Campinas, v.18, p. 541-547, 1994.

SMITH, J.L. & PAUL, E.A. The significance of soil microbial biomass estimations. In: BOLLAG, J.M. E STOTZKY, G. (Eds). **Soil biochemistry**. New York, Marcel Dekker, v. 6, p. 357-396. 1990.

SINGH, J.S. & GUPTA, S.R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. **Botanical Review**, v. 43, p. 449-528. 1977.

SINGH, J.S.; RAGHUBANSHI, A.S.; SINGH, R.S. & SRIVASTAVA, S.C. Microbial biomass acts as source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. **Nature**, v.338, p. 499-500, 1989.

SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M. de S; GRISI, B.M.; HUNGRIA, M. & ARAUJO, R.S. **Microrganismos e processos biológicos do solo: perspectiva ambiental**. Brasília: EMBRAPA –SPI, 1994. 142p. (EMBRAPA-CNPAF, Documentos, 45).

SWIFT, M.J.; HEAL, O.W. & ANDERSON, J.M. **Decomposition in terrestrial ecosystems**. Oxford England: Blackwell Scientific, 1979.

SOUZA NETO, J. M. **Formação de pastagens de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu com o milho como cultura acompanhante**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1993. 58 p.

SPAIN, J.M.; AYARZA, M.A. & VILELA, L. **Crop pasture rotations in the Brazilian Cerrados**. In: International Symposium on Tropical Savannas. 1<sup>st</sup> ed. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – CPAC, Brasília, DF. pp 39-45, 1996.

SPARLING, G. P.; SHEPHERD, T. G. & KETTLES, H. A. Changes in soil organic C, microbial C and aggregate stability under continuous maize and cereal cropping, and after restoration to pasture in soil from the Manawatu region. **New Zealand Soil and Tillage**, Wellington, v. 24, p. 225-241, 1992.

STENBERG, B. Monitoring soil quality of arable land: Microbiological indicators. **Soil and Plant Science**, v. 49, p. 1-24. 1999.

TABATABAI, M.A. & BREMNER, J.M. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 34:225-229, 1970.

TABATABAI, A. Soil Enzymes. In: WAVER, R.W.; ANGLE, J.S. & BOTTOMLEY, P.S. (Eds). **Methods of Soil Analyses. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties**, second ed. **Soil Sci Soc Am, Madison**, WI, USA, pp 775-833, 1994.

TAYLOR, J.P.; WILSON, B.; MILLS, M. S. & BURNS, R.G. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.34, n.3, p 387-401, 2002.

TATE, K.R.; ROSS, D.J. & FELTHAM, C.W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: effects of experimental variables and some different calibration procedures. **Soil Biol. Biochem.**, Oxford, 20 (3): 329-335, 1988.

TRASAR-CEPEDA, C.; LEIRÓS, C.; GIL-SOTRES, F. & SEOANE, S. Towards a biochemical quality index for soils: An expression relating several biological and biochemical properties. **Biology and Fertility of Soils**, v.26, n. 2, p. 100-106. 1998.

TÓTOLA, M.R. & CHAER, G.M. Microorganismos e processos microbiológicos como bioindicadores da qualidade dos solos. In: Tópicos em ciência do solo – publicação da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – vol. 1. Viçosa – MG, 2:105-276. 2002.

TOWNSEND, C. R. Renovação de pastagens degradadas em consórcio com milho na Amazônia Ocidental. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 18., 2000, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: ABMS. CDROM

TURCO, R.F.; KENNEDY, A.C. & JAWSON, M.D. Microbial indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D. F. & STEWART, B.A. (Eds) Defining soil quality for a sustainable environment. Madison: **Soil Science Society of American**, p.73-90, 1994. (Special publication, 35).

TURCO, R.F. & BLUME, E. **Indicators of soil quality**. In: SIQUEIRA, J.O. [Et al.] (Eds.) Soil fertility, soil biology and nutrition interrelationships. Viçosa- Lavras. SBCS: UFLA[DCS], p. 529-550. 1999.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C. & JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 19, p. 703-707, 1987.

VARGAS, L.K. & SCHOLLES, D. Biomassa microbiana e produção de C-CO<sub>2</sub> e N mineral de um solo Podzólico Vermelho-Escuro submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.35-42, 2000.

VILELA, L.; SOUSA de, D.M.G. & MARTHA Júnior, G.B. **Avaliação da Viabilidade Agrônômica e Econômica de Adubação de Manutenção em Pastagem de *Brachiaria decumbens* na Região do Cerrado**. Planaltina-DF, pp 2-3, 2002.

VITTI, G.C.; RODRIGUES, L.R.S. & JACOB, F.G.M. **Nutrição e adubação de Pastagens da Região do Cerrado Brasileiro**. Piracicaba – SP, p 7-15, 2001.

WANG, W.J.; DALAL, R.C.; MOODY, P.W. & SMITH, C.J. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content. **Soil Biology & Biochemistry**. V. 35, n. 2, p. 273-284., 2003.

WICK, B.; KUHNE, R.F. & VLEK, P.L.G. Soil microbiological parameters as indicators of soil quality under improved fallow management systems in south-western Nigeria. **Plant and Soil**, The Hague, v. 202, n. 1, p. 97-107, 1998.

ZAK, J.C.; WILLIG, M.R.; MORRHEAD, D.L. & WILDMAN, H.G. Functional diversity o microbial communities: a quantitative approach. **Soil Biology and Biochemistry**, 26: 1101-1108, 1994.

ZILLER, S.R. **A Estepe Gramíneo-Lenhosa no segundo planalto do Paraná: diagnóstico ambiental com enfoque à contaminação biológica**. Tese de doutorado. Curitiba: Universidade Federal do Paraná., 2000. 268 p.

ZIMMER, A.H.; MACEDO, M.C.M.; BARCELLOS, A.O. & KICHEL, A. N. **Estabelecimento e recuperação de pastagens de Braquiaria**. In: Anais do 11 Simpósio Sobre Manejo da Pastagem. FEALQ. Piracicaba, SP, pp 153-208, 1994.

## **CAPÍTULO 1**

### **ATIVIDADE ENZIMÁTICA E BIOMASSA MICROBIANA COMO INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM DIVERSOS AGROECOSSISTEMAS DA REGIÃO DOS CERRADOS**

Trabalho a ser encaminhado para publicação na Revista Brasileira de Ciência do Solo

# ATIVIDADE ENZIMÁTICA E BIOMASSA MICROBIANA COMO INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM DIVERSOS AGROECOSSISTEMAS DA REGIÃO DOS CERRADOS

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o uso do carbono da biomassa microbiana (CBM) e da atividade enzimática como indicadores de qualidade do solo em diversos agroecossistemas da região dos cerrados comparando-os a atributos químicos (pH, matéria orgânica, teores de P, Ca, Mg, K, CTC e saturação por alumínio) e físicos (densidade aparente, porosidade total, macroporosidade e microporosidade) do solo. Amostras de solo foram coletadas em março de 2006, na profundidade de 0 a 10 cm, em três áreas: área I, rotação milho/soja sob plantio direto (PD) e plantio convencional (PC) iniciado em 1992; área II, plantio de 25 anos de idade com as espécies florestais: pinus (*Pinus tecunumanii*), eucalipto (*Eucalyptus grandis*) e de 21 anos de idade com carvoeiro (*Sclerolobium paniculatum* Vogel) e, área III, experimento iniciado em 1991 com sistemas integrados lavoura/pecuária onde foram avaliados cinco sistemas de manejo: pastagem contínua de gramínea, pastagem consorciada contínua, rotação de pastagem consorciada/lavoura, rotação lavoura/pastagem consorciada e lavoura contínua sob PD. Em cada local, áreas adjacentes sob vegetação nativa de Cerrado foram incluídas no estudo sendo utilizadas como referência das condições originais do solo. O CBM foi avaliado pelo método da fumigação-extração enquanto que a atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase foi avaliada com base na determinação colorimétrica do *p*-nitrofenol liberado por essas enzimas, quando o solo é incubado com substratos específicos para cada uma delas. Para visualizar as semelhanças entre os diferentes agroecossistemas com base em todos os atributos avaliados, foi utilizada uma análise de componentes principais (PCA). Na área I, o PD promoveu acúmulo de matéria orgânica e nutrientes nos 10 cm iniciais do solo e apresentou maiores níveis de CBM e atividade enzimática, em relação à área manejada sob PC. Na área II, os valores de CBM obtidos nas áreas de Cerrado nativo foram o dobro dos valores obtidos nos plantios de espécies florestais. O plantio de pinus apresentou os menores valores de fosfatase ácida e arilsulfatase, enquanto o plantio de eucalipto apresentou a maior atividade da  $\beta$ -glicosidase. Na área III, teores mais

elevados de atividade da fosfatase ácida e da arilsulfatase foram observados nas pastagens contínuas consorciadas em comparação ao tratamento com lavoura contínua. A análise de componentes principais revelou que os indicadores microbiológicos foram os atributos que apresentaram mais sensibilidade para diferenciar os agroecossistemas reforçando a importância da inclusão dos mesmos em um conjunto mínimo de dados a serem considerados nos estudos e nos cálculos dos índices de qualidade de solo.

**Palavras-chave:** plantio direto, plantio convencional, pinus, eucalipto, pastagem, sistemas integrados lavoura/pecuária.

## ENZYME ACTIVITIES AND MICROBIAL BIOMASS AS INDICATORS OF SOIL QUALITY UNDER DIFFERENT AGROECOSYSTEMS IN THE CERRADO REGION

### ABSTRACT

The objective of the present study was to evaluate the use of microbial biomass carbon (MBC) and soil enzyme activities as indicators of soil quality under different management systems in the cerrado region, comparing them to chemical (pH, organic matter, P, Ca, Mg, K, CEC and Al saturation) and physical (bulk density, macro, micro and total porosity) soil attributes. In March 2006 soil samples were collected to a depth of 10 cm in three areas: area I) corn/soybean rotation under no-tillage (NT) and conventional tillage (CT) initiated in 1992; area II) 16 year-old forest systems with pinus (*Pinus tecunumanii*), eucalyptus (*Eucalyptus grandis*) and a cerrado native species called carvoeiro (*Sclerolobium paniculatum* Vogel); area III) an experiment initiated in 1991 where annual cropping systems are integrated with pastures ( five treatments were evaluated: continuous grass pastures, continuous grass and legume based pastures, continuous annual cropping systems, annual cropping systems integrated with grass and legume based pastures and grass and legume based pastures integrated with annual cropping systems). Native cerrado fragments adjacent to the three areas were used as references. MBC was evaluated using the chloroform fumigation extraction method and the activity of the soil enzymes  $\beta$ - glucosidase, acid phosphatase, and arylsulfatase were determined based on the colorimetric determination of the *p*-nitrophenol released by these enzymes when the soil is incubated with their specific substrates. A principal component analysis (PCA) was used to visualize the similarities across the management systems based on the chemical, physical and microbiological soil parameters. As

compared to the CT, in area I, NT resulted in the accumulation of organic matter , nutrients, MBC and soil enzyme activities in the first 10cm. In area II, the MBC under the native cerrado areas was greater than under the forest systems. In this area, the lowest values of acid phosphatase and arilsulfatase were determined under pinus whereas the eucalyptus presented the greatest  $\beta$ - glucosidase activity. In area III, greater acid phosphatase and arylsulfatase activities were observed under the continuous grass and legume based pasture as compared to the continuous annual cropping system. PCA analysis showed that the microbial indicators presented the greatest sensibility to distinguish the agroecosystems evidencing the importance of their inclusion in a minimum data set to be considered in the studies and in the calculation of soil quality indexes.

**Key words:** no-tillage, conventional tillage, pine, eucalyptus, pastures, lay/farming systems.

# **ATIVIDADE ENZIMÁTICA E CARBONO DA BIOMASSA MICROBIANA COMO INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM DIVERSOS AGROECOSSISTEMAS DA REGIÃO DOS CERRADOS.**

## **1. INTRODUÇÃO**

De uma maneira geral, o conceito de qualidade da água e do ar e de como o mau uso desses recursos pode afetar a saúde humana e o meio ambiente, estão relativamente bem estabelecidos. Entretanto, embora todo sistema de produção alimentar e de fibras da humanidade seja baseado no uso do solo, o interesse pelo tema "Qualidade de solo" é relativamente recente (datando do fim da década de 80 e início da década de 90) e por isso ainda existe uma carência de estudos sobre indicadores que possam quantificar e monitorar mudanças na qualidade dos solos (Doran & Parkin, 1994). A multiplicidade de fatores químicos, físicos e biológicos que controlam os processos biogeoquímicos do solo e suas variações em função do tempo e espaço, contribuem para que esse seja um ambiente de elevada complexidade, dificultando nossa capacidade de acessar a sua qualidade e identificar atributos chaves que possam servir como indicadores do seu funcionamento (Larson & Pierce, 1991). Cientes dessas limitações e do fato de que nenhum indicador individualmente irá descrever e quantificar todos os aspectos da qualidade do solo, um conjunto mínimo de indicadores englobando atributos físicos, químicos e biológicos devem ser utilizados nas análises de qualidade do solo (Doran & Parkin, 1994). Dentre as características que um bom indicador de qualidade de solo deve possuir destacam-se sua capacidade de refletir algum aspecto do funcionamento do ecossistema; mostrar uma resposta rápida e precisa a qualquer perturbação; ser de simples determinação e barato e possuir distribuição universal, mas com especificidades regionais (Halloway & Stork, 1991).

Vários estudos mostram que os indicadores biológicos são mais sensíveis que indicadores químicos e físicos para detectar com maior antecedência, alterações que ocorrem no solo em função do seu uso e manejo (Doran, 1980; Dick, 1994, Trasar-Cèpeda et al., 1998; Matsuoka et al. 2003; Chaer & Totola, 2007). Isto ocorre porque os microrganismos são a parte viva e mais ativa da matéria orgânica do solo, atuando em processos que vão desde a decomposição de resíduos de plantas e animais, ciclagem biogeoquímica dos elementos, formação da matéria orgânica e da estrutura do solo, até a

biorremediação de pesticidas e metais pesados (Turco et al., 1994). A participação dos microrganismos em todos esses processos justifica a necessidade da inclusão dos indicadores biológicos nos índices de qualidade do solo e de estudos visando selecionar quais indicadores biológicos seriam os mais apropriados para este fim (Turco et al. 1994; Tótola & Chaer, 2002, Mendes & Reis Junior, 2004).

Dentre as variáveis utilizadas para se caracterizar o componente biológico dos solos destacam-se as medidas de biomassa, atividade e diversidade microbiana. A biomassa microbiana do solo é constituída por fungos, bactérias, actinomicetos, protozoários, algas e microfauna, excluindo-se as raízes e animais inferiores a  $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$  (De-Polli & Guerra, 1999; Gama-Rodrigues, 1999). Como podem ocorrer situações em que os solos apresentam elevadas quantidades da biomassa inativa e vice-versa, determinações sobre a atividade microbiana são importantes, pois permitem avaliar o estado metabólico atual e potencial das comunidades de microrganismos no solo (Mendes & Reis Junior, 2004). Medidas de respiração microbiana, mineralização de nitrogênio e de atividade enzimática, estão entre os indicadores mais comumente estudados para se avaliar a atividade microbiana dos solos. As avaliações de diversidade microbiana fornecem, por sua vez, indicativos sobre o número de espécies (diversidade genotípica) e variedade de funções (diversidade funcional) presentes em um determinado solo.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o uso do carbono da biomassa microbiana (CBM) e da atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase como indicadores de qualidade do solo em diversos agroecossistemas da região dos cerrados comparando-os a atributos químicos e físicos do solo.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Descrição dos locais**

A coleta das amostras de solo foi realizada em março de 2006 na Embrapa Cerrados, Planaltina- DF. A altitude do local é de 1175m e as coordenadas geográficas são: 15° 35' 30" de latitude sul e 47° 42' 00" de longitude a oeste de Greenwich. O clima da região é do tipo tropical estacional (Aw) conforme classificação de Köppen, com precipitação média de 1500 mm concentrada no período que ocorre de outubro a março. O período seco, definido em termos de déficit hídrico, tem duração de 5 a 6

meses e as médias das temperaturas máximas e mínimas são de 26,4°C e 15,9°C, respectivamente.

Para a realização do estudo foram selecionadas três áreas com distintos sistemas de uso do solo, a saber: área I, rotação milho/soja sob Sistemas de Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC); área II, Sistemas Florestais com pinho (*Pinus tecunumanii*), eucalipto (*Eucalyptus grandis*) e carvoeiro (*Sclerolobium paniculatum* Vogel) e área III, com Sistemas Integrados Lavoura/Pecuária. Em cada local, áreas adjacentes sob vegetação nativa de Cerrado foram utilizadas como referência para fornecer informações sobre as condições originais do solo.

### **2.1.1 Área com Sistemas de Plantio Direto e Plantio Convencional**

Para avaliação do efeito de um sistema consolidado de PD em comparação ao PC, as amostragens foram realizadas num experimento iniciado em 1992, montado originalmente com delineamento em blocos ao acaso e três repetições em diferentes localidades. Atualmente, apenas um dos blocos vem sendo conduzido. Desta forma, as avaliações do presente estudo foram realizadas nesta repetição do experimento localizada num Latossolo Vermelho Amarelo argiloso. Antes de 1992, a utilização desta gleba se deu com culturas anuais (principalmente soja) durante 15 anos, sob sistema de preparo de solo convencional. Essa repetição do experimento consiste de 4 faixas sendo duas com PD (320 m de comprimento por 50 m de largura) e duas com PC (320 m de comprimento por 25 m de largura). Para cada sistema de manejo, uma das faixas consta da sucessão milho/soja e a outra, soja/milho. As faixas de PD são subdivididas em talhões de 1700 m<sup>2</sup>, onde culturas de cobertura (milheto, *Brachiaria brizantha*, *Brachiaria decumbens*, sorgo, aveia preta) foram plantadas na safrinha (final da estação chuvosa) até o ano de 2004, em sucessão ao milho ou soja. As parcelas amostradas foram as do milheto. As faixas de PC são mantidas em pousio até o preparo do solo para a safra seguinte, que é realizado com uma aração e duas gradagens. Neste estudo, foram amostrados os seguintes tratamentos: sucessão milho/soja em PD e sucessão milho/soja em PC. Uma área adjacente sob vegetação nativa do tipo cerrado ralo constituiu o padrão de referência do solo em condições naturais. Para uma melhor representação da variabilidade espacial dos parâmetros, as áreas sob PD, PC e cerrado foram subdivididas em três parcelas de 11 m x 50 m, 11 m x 25 m e 15m x10 m, respectivamente. Os dados apresentados constituem as médias dessas três parcelas.

### **2.1.2 Área com Sistemas Florestais**

O estudo foi conduzido num Latossolo Vermelho Amarelo de textura argilosa sob diferentes coberturas florestais: floresta de pinho com 21 anos de idade (espaçamento entre linhas de 3,0m e entre árvores de 3,0m), floresta de eucalipto com 25 anos de idade (espaçamento entre linhas de 3,0m e entre árvores de 2,0m), floresta de Carvoeiro (*Sclerolobium paniculatum* Vogel), espécie nativa do Cerrado com potencial para reflorestamento, também com 25 anos de idade (espaçamento entre linhas de 3,0m e entre árvores de 2,0m). Cada área foi subdividida em três parcelas de 30 m x 40 m (plantação de Pinus), 15 m x 15 m (eucalipto) e 6 m x 50 m (carvoeiro), respectivamente. Os dados apresentados constituem as médias dessas três parcelas. Como referências, foram utilizadas áreas sob vegetação nativa do tipo Cerrado sensu stricto adjacentes à área de pinho (Cerrado I) e à áreas de eucalipto e carvoeiro (Cerrado II). Essas áreas também foram subdivididas em três parcelas de 30x40m (Cerrado I) e 15x15m (Cerrado II).

### **2.1.3 Área com Sistemas Integrados Lavoura/Pecuária**

Amostras de solo foram coletadas em um experimento de integração lavoura/pecuária, iniciado em 1991, num Latossolo Vermelho, textura argilosa. Deste experimento foram selecionados cinco sistemas de uso do solo: pastagem contínua de gramínea pura, pastagem consorciada contínua, rotação de pastagem consorciada/lavoura, rotação lavoura/pastagem consorciada e lavoura contínua. Além das parcelas com esses tratamentos, são mantidas quatro parcelas sob vegetação tipo cerrado ralo, em áreas adjacentes ao experimento. Embora essas áreas tivessem sinais visíveis de antropização elas foram utilizadas como referencial para se avaliar as condições originais do solo.

A seqüência de culturas no tratamento Lavoura Contínua de 1991 até 2006 foi soja-soja-milho-soja-milho-soja-milho-soja-soja-milheto-soja-milheto-soja-soja-sorgo-soja. Nos quatro primeiros anos, esse tratamento foi manejado com arado de discos e de aiveca mas, a partir de 1995, vem sendo utilizado o plantio direto. O capim utilizado na pastagem contínua de gramíneas até o ano 2000 foi o *Andropogon gayanus* cv. Planaltina. Na pastagem consorciada plantava-se *Andropogon gayanus* cv. Planaltina e *Stylosanthes guianensis* cv. Mineirão. A partir do ciclo 1999/2000, o *Andropogon gayanus* cv. Planaltina das pastagens contínuas e consorciadas foi substituído pela

*Brachiaria decumbens* e nas áreas de sistemas integrados lavoura/pastagem foi introduzido o *Panicum maximum* cv Tanzânia. O intuito desta substituição foi o de aproveitar a melhoria da fertilidade introduzindo-se forrageiras mais produtivas e adaptadas ao período de seca, como a braquiária. Os ciclos de rotação lavoura/pastagem e pastagem/lavoura são realizados a cada quatro anos, sendo que o primeiro ciclo foi iniciado após o quarto cultivo (safra 95/96). O ciclo atual (quarto ciclo) teve início na safra 2004/2005 e terá seu término na safra 2007/2008.

Na amostragem, realizada em março de 2006, o tratamento lavoura/pastagem consorciada estava com pastagem consorciada e o tratamento pastagem consorciada/lavoura estava com lavoura de soja. O manejo do solo usado nas culturas anuais foi o plantio direto.

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com duas repetições em parcelas de 2 ha divididas em subparcelas de 40 x 100m.

## **2.2 Coleta, preparação e armazenamento das amostras**

A coleta das amostras de solo foi realizada no período chuvoso em março de 2006, na profundidade de 0-10 cm, com a utilização de um trado holandês. Foram retiradas amostras indeformadas em anéis volumétricos para a determinação da densidade do solo e porosidade. Amostras deformadas foram retiradas para análises biológicas, químicas e físicas de rotina (10 subamostras, por talhão, para compor uma amostra composta). Para a realização da amostragem nos tratamentos sob PD e PC da área I e nos tratamentos sob lavoura da área III (10 subamostras por parcela), foi utilizado o esquema proposto por Nicolodi et al. (2002) onde a amostragem é realizada perpendicularmente à linha de plantio sendo realizados cinco furos (um furo no centro da linha de plantio, mais dois de cada lado). Nas áreas sob pastagens, nos sistemas florestais e nas áreas de cerrado utilizadas como referência, os 10 pontos de subamostragem em cada parcela foram escolhidos aleatoriamente.

As subamostras foram homogeneizadas e colocadas em saco plástico para serem transportadas ao laboratório de Microbiologia do Solo da Embrapa Cerrados, onde foram passadas por uma peneira de malha 4 mm. Resíduos de plantas e raízes foram removidos cuidadosamente. Após esta operação, a determinação da umidade do solo foi efetuada pelo método gravimétrico, secando-se parte das amostras em estufa a 100°C por

72 horas. O restante das amostras de solo foram armazenadas a uma temperatura de 7° C a 10° C, até o momento da realização dos ensaios.

### **2.3 Análises Químicas**

As amostras foram secas ao ar e submetidas a análises de pH em água, matéria orgânica e teores de P, Ca, Mg, K, S e Al. Os teores de matéria orgânica foram determinados utilizando-se o método de Walkley & Black (Nelson & Sommers, 1982). Ca, Mg and Al foram extraídos com KCl 1N e determinados por absorção atômica (Ca e Mg) e titulação com NaOH 0.025 M (Al); P e K foram extraídos com o extrator Mehlich 1 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.0125 M + HCl 0.05 M) e determinados através de espectrofotometria de ionização de chama (K) e usando o método do azul de Mo (P) conforme descrito em EMBRAPA, 1979.

### **2.4 Análises Físicas**

As análises de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade foram realizadas no Laboratório de Física de solos da Embrapa Cerrados.

A densidade do solo foi obtida retirando-se amostras indeformadas coletadas pelo método do anel volumétrico (Kopecky), com auxílio do amostrador tipo Uhland, onde o solo do anel foi pesado e seco a 105<sup>0</sup> C por aproximadamente 24 horas, até o peso permanecer constante (Embrapa, 1997). Determinou-se a densidade do solo, em g.cm<sup>-3</sup>, por meio da expressão:  $D_s = M_s \cdot V_t^{-1}$ , onde  $M_s$  = massa da amostra de solo seca a 105<sup>0</sup>C e  $V_t$  = volume do anel (cm<sup>3</sup>).

Utilizando-se o método da centrífuga (Freitas Jr & Silva, 1984), a curva característica de retenção de água foi determinada. A porosidade total foi determinada a partir dos valores obtidos da curva característica de retenção de água quando o solo estava saturado (0 kPa).

A macroporosidade foi determinada pelo método da mesa de tensão. O peso correspondente ao volume de água, retirado sob pressão negativa de 60 cm de coluna de água, constituiu a quantidade de macroporos.

A microporosidade foi determinada a partir dos valores obtidos na curva característica de retenção de água, ou seja, pelo volume ocupado pela água na tensão de 6 kPa (solo na capacidade de campo).

## **2.5 Análises Microbiológicas**

### **2.5.1 Carbono da Biomassa Microbiana (CBM)**

O CBM foi determinado utilizando-se o método CFE – clorofórmio - fumigação-extração proposto por Vance et al. (1987). Depois da coleta no campo, quando necessário, o teor de umidade das amostras de solo (20g) foi elevado a 100% da capacidade de campo e estas foram pré-incubadas, no escuro, por sete dias, à temperatura ambiente. Em seguida, metade das amostras de solo foi fumigada por 48 horas em um dessecador, contendo uma placa de Petri com 25ml de clorofórmio livre de álcool. Durante este período, as amostras não-fumigadas foram mantidas à temperatura ambiente. O carbono da biomassa microbiana foi extraído pela adição de 50ml de uma solução de sulfato de potássio (0,5 mol/L de  $K_2SO_4$ ) às amostras de solo, que foram então submetidas à agitação horizontal (150 rpm) por 40 minutos. As amostras foram filtradas separando-se 8ml aos quais foram adicionados em seguida 2ml de  $K_2Cr_2O_7$  (0,4mol/L) e 15ml de uma mistura de  $H_2SO_4$  e  $H_3PO_4$  na proporção de 1:2 em erlenmeyers de 250ml. Essa solução foi fervida sob refluxo por 30 minutos, resfriada e diluída com 20ml de água destilada adicionada pelo condensador. Por titulação, o dicromato residual foi medido com uma solução de sulfato ferroso amoniacal  $[(NH_4)_2Fe(SO_4)_6 \cdot 6H_2O]$  em ácido sulfúrico concentrado, na presença de um indicador composto por fenantrolina (0,075mol/L) e sulfato ferroso (0,041 mol/L). A quantidade de CBM foi determinada pela diferença entre o carbono orgânico extraído das amostras de solo fumigadas e não fumigadas, usando um fator de correção ( $K_{ec}$ ) igual a 0,35.

### **2.5.2 Atividade enzimática: $\beta$ -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase**

Foram avaliadas a atividade de enzimas do solo associadas ao ciclo do carbono ( $\beta$ -glicosidase), do fósforo (fosfatase ácida) e do enxofre (arilsulfatase), utilizando-se os métodos descritos por Tabatabai (1994). Esses métodos baseiam-se na determinação colorimétrica do *p*-nitrofenol (coloração amarela) formado após a adição de substratos

incolores específicos para cada enzima avaliada, a saber: *p*-nitrofenil- $\beta$ -D-glicopiranosídeo, *p*-nitrofenilfosfato e *p*-nitrofenil sulfato, para as enzimas  $\beta$ -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase, respectivamente. Para cada amostra de solo coletada no campo foram realizadas duas repetições analíticas no laboratório, mais os controles. A atividade enzimática do solo é expressa em  $\mu\text{g}$  *p*-nitrofenol liberado por hora por grama de solo seco.

### 3. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Por se tratar de um estudo de comparação de sistemas, onde não existe um delineamento experimental, nas áreas sob PD e PC e nas áreas dos sistemas florestais, a comparação dos dados foi feita através da utilização do teste não-paramétrico de Wilcoxon a 10% de probabilidade.

Na área do experimento com sistemas integrados lavoura/pecuária, os dados foram analisados utilizando-se o PROC GLM do programa estatístico SAS Statistics Analytical System (SAS Institute. Cary, 1997). Os efeitos principais foram separados e testados pelo teste F a 10, 5 e 1% de significância, utilizando-se contrastes não-ortogonais. Embora se constituam na referência sobre as condições originais do solo, as parcelas de cerrado nativo não fizeram parte das análises estatísticas, pois não foram casualizadas no experimento.

Por fim também foi utilizada uma análise de componentes principais (PCA) para a ordenação dos agroecossistemas avaliados. A dispersão dos escores obtidos para cada um dos agroecossistemas em um sistema de eixos cartesianos, representado pelos componentes principais, permite visualizar as semelhanças entre os tratamentos com base nas “n” variáveis analisadas, maximizando o aproveitamento da variabilidade disponível. Foram utilizados na matriz primária os dados de densidade de solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, matéria orgânica, CTC, CBM, fosfatase ácida,  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase. Os dados de pH, saturação por alumínio (Al%) e P não foram incluídos na matriz primária por serem naturalmente bastante diferenciados entre as áreas nativas e as áreas cultivadas e por serem facilmente alterados com o uso de calagem e adubação. Para essa análise, utilizou-se uma matriz de correlação entre todas as variáveis. Implicitamente, o uso deste tipo de matriz considera que todas as variáveis incluídas na análise possuem pesos iguais, independentemente das unidades de medidas empregadas ou da ordem de grandeza dos valores das mesmas.

Para identificar as variáveis relacionadas às diferenças entre sítios utilizou-se a correlação de Pearson entre os escores dos sítios na ordenação e os valores de todas as variáveis incluídas na matriz primária. Além disto, os coeficientes de correlação de Pearson entre os escores dos sítios e os valores das variáveis de fertilidade do solo também foram calculados. Embora essas variáveis não tenham sido empregadas na análise de ordenação e, por isso, não tenham influenciado a separação dos sítios, o coeficiente de Pearson destas foi calculado para permitir a observação de tendências de covariação entre a fertilidade do solo e as variáveis físicas e biológicas associadas à qualidade do solo.

As diferenças entre os agroecossistemas foram determinadas pela técnica do MRPP (multi-response permutation procedures), que compara os agroecossistemas com relação às diferenças em todas as variáveis da matriz primária, ao mesmo tempo. Para essa análise os dados foram transformados em relação ao máximo valor encontrado para cada variável, ao qual atribuiu-se o valor 1. O valor  $p$  expressa a significância da diferença.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Características físicas e químicas**

Os dados das propriedades físicas dos solos das três áreas avaliadas são apresentados na tabela 1. Os solos das áreas de rotação milho/soja manejadas sob PD e PC apresentaram maior densidade que o solo sob cerrado usado como referência. Esse aumento na densidade, por sua vez, não se refletiu de forma significativa nas análises de macro e microporosidade. Resultados semelhantes foram reportados por Costa et al. (2003), na camada de 0 a 10 cm de um Latossolo Bruno argiloso, no Paraná, manejado sob PD e PC por 21 anos. Aumentos na densidade do solo também foram observados nos plantios de eucalipto e pinho, sendo que na área sob pinho houve uma redução na macroporosidade e porosidade total, acompanhada de aumento na microporosidade. Na área III, nos sistemas integrados lavoura pecuária, todas as áreas cultivadas apresentaram maiores valores de densidade de solo que as áreas de cerrado. A pastagem permanente de gramínea apresentou valores de densidade significativamente superiores aos observados na pastagem consorciada contínua e nas rotações lavoura/pastagem e pastagem/lavoura (Tabelas 3 e 6). Em relação aos tratamentos pastagem consorciada

contínua e rotação pastagem/lavoura o aumento na densidade da pastagem contínua de gramíneas também foi acompanhado de reduções significativas na macroporosidade do solo (Tabelas 3 e 6). Além de características relacionadas à arquitetura do sistema radicular e à cobertura do solo pelas gramíneas utilizadas nessa pastagem é possível que esses resultados também estejam relacionados ao pisoteio de animais (Mapfumo et al., 1999) e à ausência de revolvimento da camada superficial do solo (Lima et al., 2004).

Os aumentos de densidade do solo em superfície, em relação às áreas sob vegetação nativa, podem ser atribuídos ao trânsito de máquinas e implementos agrícolas, (Cavenage et al., 1999; Islam & Weil, 2000; Araújo et al., 2004), ao pisoteio de animais (Spera et al., 2004) e às reduções nos teores de matéria orgânica (Dalal & Chan, 2001). Costa et al. (2003) também citam que a classe de solo, as condições de umidade, nas quais são realizadas as operações de preparo, semeadura, tratamentos fitossanitários e colheita, bem como o tempo de utilização do manejo adotado também influenciam no comportamento da densidade do solo sob diferentes sistemas de uso. Embora a porosidade total do solo (volume ocupado por água e ar) seja inversamente relacionada à sua densidade, nem sempre os aumentos na densidade se refletiram em reduções na porosidade, conforme também verificado por Costa et al. (2003) e Bertol et al. (2004).

Na área I, o menor revolvimento do solo aliado ao acúmulo de restos culturais na superfície, no tratamento sob PD, resultou em maiores teores de matéria orgânica e nutrientes nos 10 cm iniciais do solo, em relação à área de PC (Tabela 2), conforme também verificado em outros trabalhos (Bayer & Mielniczuk, 1997; Falleiro et al, 2003). Na área II, verificou-se um aumento significativo de matéria orgânica no reflorestamento com carvoeiro. Embora a quantidade de folhiço retornada ao solo em cada um dos três sistemas florestais não tenha sido avaliada é possível que esse aumento no teor de matéria orgânica no plantio de carvoeiro esteja relacionado à quantidade e à qualidade dos resíduos vegetais retornados ao solo pelo carvoeiro, que é uma espécie leguminosa. Garay et al. (2003) ao compararem os teores de matéria orgânica em plantios de sete anos de idade da leguminosa *Acacia mangium* e de eucalipto, no Espírito Santo, verificaram que o maior estoque de folhiço no plantio de acácia (10 ton/ha, em comparação a 5 ton/ha no plantio de eucalipto) aliados à sua menor relação C/N resultaram em maior incorporação de matéria orgânica ao solo. Aumentos significativos nos teores de potássio, cálcio e magnésio foram observados nas áreas de eucalipto (Tabela 2) e podem estar relacionados à reciclagem de nutrientes pelo sistema radicular dessa espécie e sua mineralização através da serapilheira, uma vez que os três plantios

(pinho, eucalipto e carvoeiro) foram adubados somente quando da sua implantação. Noble & Randall (2005) verificaram em um estudo conduzido na Austrália, que o retorno de nutrientes na forma de serapilheira de *E. cloeziana* aumentou os teores de Ca, Mg, K e Na no solo. Zaia & Gama-Rodrigues (2004) compararam a ciclagem e o balanço de nutrientes em povoamentos com três espécies de eucalipto (*E. grandis*, *E. camaldulensis* e *E. pellita*) na região do norte fluminense e verificaram que o *E. grandis*, devido aos seus menores teores de lignina, possuiu taxas mais elevadas de decomposição de serapilheira, possibilitando uma maior taxa de ciclagem de nutrientes.

Na área III, verificou-se que, devido ao aporte anual de adubos, o tratamento sob lavoura contínua apresentou os maiores teores de P, K e Ca. A análise de contrastes (Tabela 4) revelou diferenças significativas ( $p < 0,1$ ) entre os teores de matéria orgânica (Tabela 2) da pastagem consorciada em comparação aos tratamentos lavoura contínua (manejada sob plantio direto) e rotação pastagem consorciada/lavoura (que estava sob lavoura na época de coleta das amostras). Essas diferenças revelam que ao melhorar a produtividade da pastagem aumentando a disponibilidade de forragem pelo aporte de nitrogênio ao sistema (Pereira, 2002), a presença da leguminosa nas pastagens consorciadas também resulta em aumentos de material orgânico nos 10 cm iniciais do solo. Fisher et al. (1994) verificaram em estudos realizados na Colômbia que a presença da leguminosa *Arachis pintoi* numa pastagem com *Brachiaria humidicola* (considerado uma gramínea com sistema radicular profundo) aumentou o estoque de carbono no solo em 7.8 ton/ha/ano, comparativamente à pastagem de gramínea.

#### **4.2 Carbono da Biomassa Microbiana (CBM)**

Reduções significativas no CBM, em relação ao solo sob vegetação nativa, foram observadas tanto na área I, rotação milho/soja sob PD e PC como na área II, nos plantios de espécies florestais (Tabela 3). Na área sob rotação milho/soja, embora o teor de biomassa sob PD tenha sido o dobro da área sob PC essa diferença não foi significativa. Nas áreas sob sistemas florestais chama atenção o fato de que, mesmo após 25 anos do estabelecimento desses sistemas, os níveis de biomassa microbiana não atingiram os patamares observados nas áreas sob vegetação nativa o que, além dos impactos associados à remoção da vegetação nativa por ocasião do estabelecimento desses plantios, pode também ser um indicativo da acirrada competição por nutrientes entre a comunidade microbiana e as espécies florestais. Reduções no CBM em solos sob

uso agrícola (Oliveira, 2000; Matsuoka et al., 2003; Mendes et al., 2003) e sob sistemas florestais (Chaer & Tótola, 2007) em relação à vegetação nativa têm sido reportadas na literatura. Entre os fatores responsáveis por condições mais favoráveis ao desenvolvimento microbiano nas áreas sob vegetação nativa destacam-se a presença de uma cobertura vegetal diversificada e permanente. Nas áreas nativas, a ausência de revolvimento do solo resulta no acúmulo de material orgânico na sua superfície, na maior presença de hifas fúngicas e raízes finas que, através da liberação de exsudatos radiculares, favorecem o desenvolvimento dos microrganismos e conseqüentemente, a ocorrência de uma maior biomassa microbiana (Matsuoka et al., 2003 e Mendes et al., 2003).

Apesar da ausência de diferenças significativa entre os cinco sistemas de manejo da área III com relação aos teores de biomassa microbiana (Tabelas 3 e 5), cabe destacar que os menores valores de CBM ocorreram nos tratamentos que estavam sob culturas anuais no momento da coleta das amostras de solo (lavoura contínua e rotação pastagem consorciada/lavoura). Também deve ser destacado que os teores de CBM nos tratamentos com pastagens contínuas (gramíneas puras e consorciadas) foram semelhantes aos do cerrado nativo usado como referência nessa área (Tabela 3), o que evidencia a capacidade dos pastos bem manejados em minimizar efeitos decorrentes do revolvimento do solo e da retirada de sua cobertura vegetal original, conforme também verificado por Bandick & Dick, (1999) e Nsabimana et al. (2004).

#### **4.3 Atividade enzimática**

A grande dependência das áreas nativas com relação à ciclagem de P orgânico pode ser verificada através dos maiores níveis de atividade da fosfatase ácida observada nessas áreas (Tabela 3). Como os solos de cerrado se caracterizam pela baixa disponibilidade de nutrientes minerais, especialmente o P (Sousa et al., 2004), a presença de uma elevada atividade da fosfatase ácida nas áreas nativas revela a adaptação desse bioma à carência de P, uma vez que o crescimento das plantas fica condicionado à ciclagem do P orgânico da serapilheira por essa enzima. Como a fosfatase ácida é inibida pela presença de teores elevados de P no solo (Tabatabai, 1994), nas áreas sob cultivos anuais com grande entrada de fósforo via adubos fosfatados os níveis de atividade dessa enzima são menores (por exemplo: tratamentos sob PD e PC na área I, e sob lavoura contínua e sistemas integrados lavoura/pastagem e pastagem /lavoura na

área III). Resultados semelhantes também foram obtidos em estudos anteriores por Mendes et al. (2003) e Carneiro et al. (2004).

A atividade da fosfatase ácida na rotação milho/soja sob PD (área I) foi significativamente superior à do PC. Resultados semelhantes foram reportados em solos de cerrado coletados na profundidade 0 a 5 cm, por Mendes et al. (2003) e Carneiro et al. (2004) e por Balota et al. (2004), no sul do Brasil. Apesar dos maiores teores de P Mehlich no PD (Tabela 2), a maior atividade da fosfatase ácida, nesse sistema, em relação ao PC, pode ser atribuída ao menor revolvimento do solo o que favorece, na área de PD, uma maior concentração do adubo fosfatado cuja localização fica restrita à linha de adubação. Dessa forma, a inibição das fosfatases por esses adubos não é tão acentuada como no PC, onde eles são incorporados ao solo. Conte et al. (2002) também verificaram que o aumento da disponibilidade de P no solo em áreas sob PD não resultou em diminuição da atividade da fosfatase ácida atribuindo esse efeito à alta afinidade do P com os colóides organo-minerais do solo favorecendo a adsorção dos ânions fosfato, e reduzindo seu efeito inibidor sobre a atividade da fosfatase; também apontaram o fato de que a atividade da fosfatase ácida é mais influenciada pelo teor de P orgânico do que pelo fósforo total.

Os solos sob reflorestamento de eucalipto e carvoeiro e sob vegetação nativa na área II apresentaram níveis médios de atividade da fosfatase 2,2 vezes superiores ao nível detectado no solo sob plantio de pinho. Ainda nessa mesma área houve também uma redução significativa na atividade da arilsulfatase no plantio de pinho (em média 2,9 vezes menor que a observada nos demais tratamentos). Nsabimana et al. (2004) obtiveram resultados semelhantes num estudo conduzido na África do Sul e atribuíram o fato à efeitos inibitórios exercidos por compostos fenólicos presentes nas acículas do pinho.

Na área III, a análise de contrastes revelou diferenças significativas na atividade da fosfatase ácida entre os tratamentos pastagem consorciada e lavoura contínua e pastagem consorciada em relação às rotações lavoura/pastagem e pastagem/lavoura (Tabela 5). Além da entrada de fósforo via adubos ser menor na pastagem consorciada, é possível que a presença das leguminosas nessa pastagem aumente a demanda por P no sistema, o que acaba se refletindo em maiores níveis de atividade da fosfatase ácida, ou ainda que a própria leguminosa possa também funcionar como fonte de enzimas para o solo, conforme verificado por Ascencio (1997) com guandu (*Cajanus cajan*).

A atividade da arilsulfatase na rotação milho/soja sob PC (área I) foi significativamente inferior às observadas no PD e no cerrado nativo (Tabela 3). Esses resultados se assemelham aos obtidos por Mendes et al. (2003), em agregados de solo coletados sob PD e PC na profundidade de 0 a 5 cm e por Balota et al. (2004), num experimento de longa duração no sul do Brasil. A maior concentração dos ânions fosfato no PD (Tabela 2) pode estar relacionada às maiores atividades da arilsulfatase nesse sistema de manejo, pois os ânions  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{SO}_4^-$  competem entre si pelos mesmos sítios de adsorção nos colóides do solo. Como o ânion  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  é adsorvido preferencialmente nesses sítios (Tisdale *et al.*, 1993), essa competição acarretaria uma lixiviação do anion sulfato nas camadas superficiais gerando uma deficiência de S que resultaria em uma maior atividade de arilsulfatase na área sob PD. Outra hipótese seria a de que o aumento da atividade da arilsulfatase sob PD possa estar relacionado a um aumento na biomassa fúngica que ocorreria nessas áreas em função do pouco revolvimento do solo (Balota et al., 2004). Os fungos possuem até 42% de seu S na forma de éster sulfato que é o substrato para essa enzima (Saggar et al., 1981; Bandick & Dick, 1999).

No experimento de sistemas integrados lavoura pecuária (área III), os níveis de atividade da arilsulfatase foram, dependendo do tratamento, semelhantes e/ou superiores aos observados nas áreas sob vegetação nativa (Tabela 3). As maiores atividades foram observadas nos tratamentos que apresentavam pastagens consorciadas (contínuas ou em rotação); por isso, entre os cinco sistemas avaliados, contrastes significativos foram observados entre as pastagens consorciadas contínuas x pastagem de gramíneas contínuas; pastagens consorciadas contínuas x lavoura contínua; pastagem de gramíneas contínua x rotação lavoura/pastagem consorciada e lavoura contínua x rotação pastagem consorciada/ lavoura (Tabela 5). Conforme também verificado com a atividade da fosfatase, é possível que a presença das leguminosas nessas pastagens seja responsável pelas maiores atividades da arilsulfatase.

A atividade da  $\beta$ -glicosidase no tratamento sob PD, na área I, foi superior às atividades determinadas no PC e no cerrado nativo (Tabela 3). Essa maior atividade está relacionada ao fato de que o menor revolvimento do solo no PD permite o acúmulo, em sua superfície, de resíduos vegetais de menor complexidade que servem de substrato para a atuação dessa enzima (Mendes et al., 2003), enquanto que a menor atividade da  $\beta$ -glicosidase na área sob PC está relacionada ao fato de que o revolvimento do solo não permite o acúmulo de resíduos vegetais, principal substrato para a atuação dessa enzima. Entre os sistemas florestais, as diferenças não foram muito acentuadas; ainda assim, a

área sob eucalipto apresentou a maior atividade da  $\beta$ -glicosidase (Tabela 3). Na área III, embora não tenham sido observadas diferenças significativas entre os cinco sistemas testados, todos eles apresentaram maiores atividades de  $\beta$ -glicosidase do que a área de cerrado nativo. A atividade dessa enzima no solo é controlada não só pela quantidade como também pela qualidade da serapilheira (Bandick & Dick, 1999). Por essa razão, em locais onde a complexidade do resíduo vegetal é elevada (área de cerrado nativo e plantios de espécies florestais) sua atividade é baixa e em locais onde a complexidade dos resíduos vegetais que retornam ao solo é menor (por exemplo, nas áreas agrícolas) sua atividade tende a ser maior (Matsuoka et al., 2003).

#### **4.4 Análises Multivariadas**

Os resultados das análises de componentes principais (PCA) são apresentados nas figuras 1, 2, e 3, onde se observa a representação, em duas dimensões, da distribuição dos agroecossistemas avaliados de acordo com as similaridades nas propriedades dos solos consideradas na matriz primária. Nessas figuras, os triângulos representam os sistemas de uso e manejo de solo e fornecem uma idéia de quão semelhantes são os agroecossistemas entre si. Apenas os eixos 1 e 2 foram interpretados. O eixo 3, ou não foi significativo ou explicava muito pouco da variação. Nas áreas I, II e III, a percentagem da variabilidade total dos dados explicada pelo eixo 3 foi de 5%, 9% e 15%, respectivamente. As áreas manejadas sob PD e PC desde 1992 e o cerrado formaram três grupos distintos (Figura 1). Na área II, não houve separação entre os dois cerrados nativos, por outro lado o pinho, o carvoeiro e o eucalipto formaram três grupos distintos (Figura 2). Na área III, o cerrado nativo formou um grupo distinto das áreas cultivadas que não se diferenciaram entre si (Figura 3). Esses resultados foram confirmados pelas análises de MRPP e evidenciam as mudanças que ocorrem no solo sob vegetação nativa após a sua conversão para área cultivada.

As correlações de todas as variáveis com a distribuição dos agroecossistemas (raios) também podem ser observadas nas figuras 1, 2 e 3. Quanto maior o comprimento dos raios, mais correlacionada é a variável com o eixo ao qual é paralela. Raios oblíquos correlacionam-se com os dois eixos. Numericamente, isso pode ser observado na tabela 7. Na área de rotação milho/soja sob PD e PC, o eixo 1 explicou 81% da variabilidade total dos dados, sendo que as variáveis que mais se correlacionaram a este eixo foram a fosfatase ácida, o CBM, a saturação por alumínio, a matéria orgânica, a arilsulfatase e o

pH. A projeção dos pontos no eixo 1, que explica a maior parcela da variabilidade desses dados, revelou que o PD foi o tratamento que mais se aproximou da área sob vegetação nativa e o PC o que mais se afastou. Essa recuperação na qualidade do solo nas áreas de PD está relacionada ao menor revolvimento do solo e ao acúmulo de resíduos vegetais na sua superfície, de forma similar ao que ocorre na área sob vegetação nativa.

Na área II, porções similares da variabilidade total foram explicadas pelo eixo 1 e pelo eixo 2 (46 e 45%, respectivamente). As projeções dos escores no eixo 2 mostram que o plantio de pinho foi o que mais se distanciou da área de cerrado nativo, com os plantios de eucalipto e carvoeiro se sobrepondo e ocupando posições intermediárias (Figura 2). Essa separação ao longo do eixo 2, está relacionada principalmente ao CBM que foi o atributo que mais se correlacionou a ele (Tabela 7). Por outro lado, as projeções no eixo 1 estiveram mais relacionadas às atividades das enzimas fosfatase ácida e arilsulfatase (Tabela 7). O plantio de pinho ficou mais próximo da origem porque apresentou os menores níveis de atividade dessas enzimas; as duas áreas de cerrado e o plantio de eucalipto se sobrepueram ocupando um nível intermediário e o carvoeiro, por ter apresentado os maiores níveis de atividade dessas enzimas, foi o que mais se distanciou da origem.

Na área III, sistemas integrados lavoura/pecuária, a maior porcentagem da variabilidade total, 58%, foi explicada pelo eixo 2 (o eixo 1 explicou 27%) o que está relacionado principalmente às variações na atividade da  $\beta$ -glicosidase, do pH, da saturação por Al e da macroporosidade que foram as variáveis que mais se correlacionaram a esse eixo (Tabela 7). A ausência de formação de agrupamentos entre os cinco sistemas de manejo dessa área (Figura 3) está relacionada ao fato de que devido ao baixo número de repetições do experimento e alta variabilidade entre elas, de uma maneira geral, houveram poucas diferenças significativas entre os tratamentos. Ao longo do eixo 2, o cerrado nativo ocupou a posição mais próxima da origem devido aos seus baixos valores de atividade de  $\beta$ -glicosidase e pH, que foram as variáveis que mais se correlacionaram a esse eixo.

A influência das variáveis químicas, físicas e biológicas na diferenciação das amostras na matriz primária é apresentada sob a forma de círculos marrons nas figuras 1, 2 e 3. Quanto mais distante o círculo do centro do gráfico (escore 0) maior é a influência desta variável na diferenciação dos agroecossistemas. Essas distâncias podem ser consideradas uma medida da sensibilidade das variáveis em separar os agroecossistemas

e são expressas numericamente na tabela 8. Nas áreas I e III os destaques foram o CBM e as três enzimas do solo e na área II, o CBM, a fosfatase ácida e a arilsulfatase. Cabe destacar que menores escores de sensibilidade foram obtidos na área III, o que novamente pode estar relacionado ao fato de que poucas diferenças significativas entre os tratamentos foram observadas nessa área.

A presença dos indicadores microbiológicos entre os parâmetros com maior sensibilidade para diferenciar os agroecossistemas avaliados reforça a importância da inclusão dos mesmos nos estudos e nos cálculos dos índices de qualidade de solo. De uma maneira geral, as diferenças detectadas por esses indicadores foram mais acentuadas quando os agroecossistemas foram comparados às áreas sob vegetação nativa, que servem como referência das condições originais do solo. Mesmo assim os indicadores microbiológicos foram capazes de revelar diferenças entre os agroecossistemas que, muito provavelmente, não teriam sido observadas com o uso das análises de rotina de química e física de solo, especialmente na área III. Além da sensibilidade para detectar mudanças, os indicadores microbiológicos utilizados (biomassa microbiana e atividade enzimática) refletem vários aspectos do funcionamento do solo, são de determinação analítica simples e barata e possuem distribuição universal, satisfazendo, portanto, os critérios para um bom indicador de qualidade de solo, conforme proposto por Halloway & Stork (1991). Ao permitirem a caracterização/quantificação da biomassa e da atividade enzimática do solo, outra vantagem do uso dos bioindicadores é tornar mais aplicado o conhecimento teórico que possuímos hoje sobre a importância dos microrganismos uma vez que, caso a maquinaria biológica do solo seja negligenciada, somente a adição de adubos não é suficiente para promover o bom desenvolvimento das plantas. A definição dos valores críticos desses bioindicadores, a identificação mais precisa de quais funções do solo estão sendo impactadas pelos diferentes sistemas de manejo e seus reflexos na produção sustentável dos cultivos é o próximo desafio desses estudos.

## 5. CONCLUSÕES

1. O PD promoveu o acúmulo de matéria orgânica e nutrientes nos 10 cm iniciais do solo e a ocorrência de maiores níveis de CBM e atividade enzimática, em relação à área manejada sob PC.
2. Os valores de CBM obtidos nas áreas de Cerrado nativo foram o dobro dos valores obtidos nos plantios de espécies florestais. O plantio de pinho apresentou os menores valores de fosfatase ácida e arilsulfatase, enquanto o plantio de eucalipto apresentou a maior atividade da  $\beta$ -glicosidase.
3. Em comparação ao tratamento com lavoura contínua, as pastagens consorciadas contínuas apresentaram teores mais elevados de atividade da fosfatase ácida e da arilsulfatase.
4. A análise de componentes principais revelou que os indicadores microbiológicos foram os atributos que apresentaram mais sensibilidade para diferenciar os agroecossistemas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, E.A.; LANI, J.L.; AMARAL, E.F. & GUERRA, A. Uso da terra e propriedades físicas e químicas de argissolo amarelo distrófico na Amazônia Ocidental. **R. Bras. Ci. Solo**, 28: 307-315, 2004.

ASCENCIO, J. Root Secreted Acid Phosphatase Kinetics as a Physiological marker for phosphorus deficiency. **Journal of Plant Nutrition**, 20 (1):9-26, 1997.

BALOTA, E.L.; COLOZZI FILHO, A.; ANDRADE, D.S. & DICK, R.P. Long-term and crop rotation effect on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**, 77: 137-145, 2004.

BANDICK, A.K. & DICK, R.P. Field management effects on soil enzymes activities. **Soil Biol. Biochem.**, 31: 1471-1479, 1999.

BAYER, C. & MIELINICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Rev. Bras. Ci Solo**, 21 : 105-112, 1997.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedade física do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Rev. Bras. Ci Solo**, 28: 155-163, 2004.

CAVENAGE, A.; MORAES, M.L.T.; ALVES, M.C.; CARVALHO, M.A.C.; FREITAS, M.L.M. & BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho escuro sob diferentes culturas. **Rev. Bras. Ci. Solo**, vol. 23, n. 4, pp. 997-1003, 1999.

CARNEIRO, R.G. **Dinâmica de parâmetros biológicos associados ao ciclo do fósforo em solo de cerrado sob diferentes sistemas de manejo**. 1999. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 1999.

CARNEIRO, R.G.; MENDES, I.C.; LOVATO, P.E. & CARVALHO, A.M. Indicadores biológicos associados ao ciclo do fósforo em solos de cerrado sob plantio direto e plantio convencional. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 39, n.7, p. 661-669, 2004.

CARVALHO, S.R. **Influência de dois sistemas de manejo de pastagens na compactação de uma Terra Roxa Estruturada.** Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1976. 89p. (Tese de Mestrado)

CHAER, G.M. & TOTOLA, M.R. Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma de plantios de eucalipto sobre indicadores de qualidade do solo. **Rev. Bras. Ci Solo**, 31: 1381-1396. 2007.

CONTE, E.; ANGHINONI, E. & RHEINHEIMER, D.S. Frações de fósforo acumuladas em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Rev. Bras. Ci Solo**, v. 26, p. 925-930, 2002.

COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V. & WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetada pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Rev. Bras. Ci Solo**, 27: 527-535, 2003.

COSTA, E. A. **Avaliação da qualidade de solo sob dois sistemas de cultivo: Plantio direto e preparo convencional.** Brasília, Universidade de Brasília, 2005. 113 p. (Tese de Mestrado).

DALAL, R.C. & CHAN, K.Y. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt. **Australian Journal of Soil Research**, 39 (3): 435-464, 2001.

DE - POLLI, H. & GUERRA, J.G.M. **C, N e P na biomassa microbiana do solo.** In. SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O. (Eds) Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, Gêneses, 1999. Cap. 17, p. 389-411.

DICK, R.P. Soil enzymes activities as indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., ed. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison: **Soil Science Society of America** (Special Publication number,35), 1994. p 107-124.

DORAN, J.W. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. **Soil Science Society of America journal**, Madison, v.44, 1980. p 765-771.

DORAN, J.W. & ZEISS, M.R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology, Amsterdam**,v.15, n.1, p. 3-11. 2000.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA/SNLCS, 1979.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro, 1997, 212p.

FALLEIRO, R.M.; SOUZA, C.M.; SILVA, C.S.W.; SEDIYAMA, C.S.; SILVA, A.A. & FAGUNDES, J.L. Influencia dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. **Rev. Bras. Ci Solo**, 27: 1097-1104, 2003.

FISHER, M.J.; RAO, I.M.; AYARZA, M.A.; LASCANO, C.E.; SANZ, J.I.; THOMAS, R.J. & VERA, R.R. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American Savanas. Centro Internacional de Agricultura Tropical, **NATURE**, vol. 371, n. 6494, 1994.

FREITAS Jr., & SILVA, E.M. Uso da centrifuga para a determinação da curva de retenção de água no solo, em uma única operação. **Pesq. Agropec. Bras.**, 19: 1423-1428, 1984.

GAMA-RODRIGUES, E.F. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A. de O. (Eds) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, p.227-243. 1999.

GARAY, I.; KINDEL, A.; CARNEIRO, R.; FRANCO, A.A.; BARROS, E. & ABBADIE, L. Comparação da Matéria Orgânica e de outros atributos do solo entre plantações de *Acacia mangium* e *Eucalyptus grandis*. **R. Bras. Ci Solo**, 27: 705-712, 2003

HOLLOWAY, J.D. & STORK, N.E. The dimension of biodiversity: The use of invertebrates as indicators of human impact. In: HAWSWORTH, D.L. (Ed). The biodiversity of microorganism and invertebrates: its role in sustainable agriculture. CAB International, Wallingford, Oxon, UK, pp, 37-63, 1991.

ISLAM, K.R. & WEIL, R.R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agric. Ecosys. Environ.**, 79: 9-16, 2000.

KARLEN, D.L. & STOTT, D.E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.R. & STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, **Soil Science Society of America**, p. 53-72, 1994. (Special Publication, 35)

LARSON, W.E. & PIERCE, F.J. Conservation and enhancement of soil quality. In: proceedings of the International Workshop on Evaluation for sustainable land management in the developing world. International board for soil research and management, **IBSRAM Proceedings**, vol. 2, n. 12. 1991.

LARSON, W.E. & PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. &

STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, **Soil Science Society of American**, 1994. p.37-52. (Special Publication, 35).

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S & LEÃO, T. P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.6, 2004

MAPFUMO, E.; CHANASYK, D.S.; NAETH, M.A. & BARON, V.S. Soil compaction under grazing of annual and perennial forages. **Can. J. Soil Sci.**, 79:191-199, 1999.

MATSUOKA, M.; MENDES, I.C. & LOUREIRO, M.F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste- MT. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 425-433, 2003.

MENDES, I.C. & VIVALDI, L. **Dinâmica da biomassa e atividade microbiana em uma área sob mata de galeria na região do DF**. In. RIBEIRO, J.F.; FONSECA, C.E.L. da; SOUSA-SILVA, J.C. (Ed). Cerrado: caracterização e recuperação de Matas de Galeria. Planaltina, DF: Embrapa-CPAC, 2001. p. 664-687.

MENDES, I.C. **Impactos de sistemas agropecuários na atividade enzimática e biomassa microbiana dos solos de Cerrado**. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, 2; MERCOSOJA, 2002, Foz do Iguaçu. Perspectivas do agronegócio de soja: anais. Londrina: Embrapa Soja, 2002. P. 246-257. (Embrapa Soja, Documentos, 180).

MENDES, I.C. & REIS JUNIOR, F.B. **Uso de parâmetros microbiológicos como indicadores para avaliar a Qualidade do Solo e a sustentabilidade dos agroecossistemas**. Embrapa Cerrados, Planaltina – DF (documentos, 112) p. 34. 2004.

MENDES, I.C.; SOUZA, L.V.; RESCK, D.V.S. & GOMES, A.C. Propriedades biológicas em agregados de um LE sob plantio convencional e direto no Cerrado. **R. Bras. Ci. Solo**, 27:435-443, 2003.

NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E. Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R. Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and Microbiological properties. **SSSA and ASA**. Madison, 1982. p.539-580.

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I. & SALET, R.L. Alternativa à coleta de uma secção transversal, com pá de corte, na largura da entrelinha, na amostragem do solo em lavouras com adubação em linha no sistema plantio direto". **Revista Plantio Direto** Maio/Junho de 2002, pp.22- 28.

NOBLE, A.D. & RANDALL, P.J. The impact of trees and fodder Shrubs on Soil Acidification. **Rural Industries Research and Development Corporation**. pag. 1-76, 2005.

NSABIMANA, D.; HAYNES, R.J. & WALLIS, F.M. Size, activity and catabolic diversity of the soil microbial biomass as affect by land use. **Applied Soil Ecology**, vol. 26, n.2, p. 81-92, 2004.

OLIVEIRA, J.R.A. **O impacto de sistemas integrados de lavouras e pastagens na biomassa – C e na atividade biológica de um Latossolo Vermelho Escuro de Cerrado**. 2000, 115 p. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Brasília, 2000.

PEREIRA, J.M. Leguminosas forrageiras em sistemas de produção de ruminantes: Onde estamos! Para onde vamos! In: OBEID, J.A.; PEREIRA, O.G.; FONSECA, D.M. da; NASCIMENTO JUNIOR, D. do. SIMFOR – Simpósio sobre manejo estratégico da pastagem. **Anais** do Simpósio sobre manejo estratégico da pastagem. Viçosa-MG, pág. 109-148, 2002.

SAGGAR, S.; BETTANY, J.R. & STEWART, J.W.B. Measurement of microbial sulfúfur in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 13, n.6, pp. 493-498, 1981.

SAS INSTITUTE INC. SAS/STAT User's guide, version 6, 12 ed., Cary, 1997. 1686 p.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO,E. & REIN,T. **Adubação com fósforo**. In. SOUSA, D.M.G. & LOBATO,E. (Ed). Cerrado: correção do solo e adubação. Planaltina, DF: Embrapa-CPAC, p. 147-168, 2004.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANEZI, R.S. & TOMM, G.O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, vol.28, no.3, pp. 533-542, 2004.

TABATABAI, A. Soil Enzymes. In: WEAVER, R.W.; ANGLE, J.S. & BOTTOMLEY, P.S. (Eds). *Methods of Soil Analyses. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties*, second ed. **Soil Sci Soc Am, Madison, WI, USA**,1994. pp 775-833

TISDALE, S.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. & HAVLIN, J.H. **Soil fertility and fertilizers**. New York: Macmillan, 1993. 634p.

TÓTOLA, M.R. & CHAER, G.M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: **Tópicos em Ciência do Solo** – publicação da Sociedade Brasileira de Ciências do Solo – vol. 1. Viçosa – MG, 2: 105-276, 2002.

TRASAR-CEPEDA, C.; LEIRÓS, C.; GIL-SOTRES, F. & SEOANE, S. Towards a biochemical quality index for soils: An expression relating several biological and biochemical properties. **Biology and Fertility of Soils**, v.26, n. 2, p. 100-106. 1998.

TURCO, R.F.; KENNEDY, A.C. & JAWSON, M.D. Microbial indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D. F. & STEWART, B.A. (Eds) *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: **Soil Science Society of American**, 1994.p.73-90. (Special publication, 35).

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C. & JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 19, p. 703-707, 1987.

ZAIA, F.C. & GAMA-RODRIGUES, A.C. Ciclagem e balanço de nutrientes em povoamentos de eucalipto na região norte fluminense. **R. Bra. Ci Solo**, 28: 843-852, 2004

Tabela 1 – Propriedades físicas dos solos na profundidade 0 a 10 cm.

	Densidade do Solo	Microporos	Macroporos	Porosidade
	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%
PD	0,93 a <sup>1</sup>	36,3	27,8	64,2
PC	0,90 ab	39,8	25,8	65,7
Cerrado	0,83 b	37,2	26,3	63,5
Eucalipto	0,91 a	32,2 b	31,8 ab	64,7 b
Carvoeiro	0,77 b	41,0 a	30,0 ab	71,0 a
Pinus	0,87 a	40,8 a	26,2 b	67,0 b
Cerrado I	0,78 b	35,8 b	34,8 a	70,7 a
Cerrado II	0,78 b	31,8 b	31,2 ab	63,0 b
Pastagem Gramínea.	1,06	29,2	28,2	57,5
Lavoura/ <b>Pastagem</b> <sup>2</sup>	0,95	32,5	28,7	61,2
Lavoura	1,03	30,7	29,2	60,0
Past. Consor./ <b>Lavoura</b>	0,93	31,2	34,2	65,5
Past. Consorciada	0,95	31,7	33,0	64,7
Cerrado	0,85	25,7	42,0	67,7

<sup>1</sup> Valores seguidos pelas mesmas letras, dentro de uma coluna, não diferiram entre si pelo teste de Wilcoxon ( $p < 0,10$ ).

<sup>2</sup> Os tratamentos de rotação lavoura pecuária em negrito indicam o sistema presente na área no momento da amostragem.

**Tabela 2** – Propriedades químicas<sup>1</sup> dos solos na profundidade 0 a 10 cm.

	<b>Matéria Orgânica</b> %	<b>pH H<sub>2</sub>O</b>	<b>M(%)</b> %	<b>P</b> mg/dm <sup>3</sup>	<b>K</b> mg/dm <sup>3</sup>	<b>Ca</b> cmolc/dm <sup>3</sup>	<b>Mg</b> cmolc/dm <sup>3</sup>	<b>CTC</b> cmolc/dm <sup>3</sup>	<b>V</b> %
				<b>Área I</b>					
PD	3,25 a <sup>2</sup>	5,54 a	0 b	13,0 a	50,0 a	3,44 a	1,06 a	10,4	44a
PC	2,99 b	5,48 a	0 b	4,5 b	34,7 b	2,38 b	0,89 ab	8,3	41b
Cerrado	3,38 a	4,75 b	43 a	0,4 c	46,7 a	0,34 c	0,47 b	9,0	10c
				<b>Área II</b>					
Eucalipto	2,92 c	4,86	60	0,7	157 a	0,47 a	0,55 a	11,2 a	13a
Carvoeiro	4,22 a	4,57	72	0,4	34 d	0,16 b	0,21 b	9,7 a	4b
Pinus	2,98 c	4,48	70	0,7	14 e	0,16 b	0,18 b	8,6 b	4b
Cerrado I	3,89 b	4,91	49	0,5	49 c	0,34 ab	0,32 b	9,6 a	8b
Cerrado II	2,55 d	4,82	69	0,5	61 b	0,22 ab	0,38 ab	8,6 b	10a
				<b>Área III</b>					
Pastagem Gramínea	3,41	5,90	0	0,9	68	2,82	0,89	8,6	45
Lavoura/ <b>Pastagem</b> <sup>3</sup>	3,37	6,06	0	5,9	99	3,97	1,17	9,2	59
Lavoura	3,13	6,01	0	6,5	115	4,38	1,01	9,9	57
Past. Consorci./ <b>Lavoura</b> <sup>3</sup>	3,12	5,50	0	6,6	65	2,62	0,77	9,2	39
Past. Consorciada	3,78	5,81	0	0,6	64	3,11	0,90	9,5	44
Cerrado	3,48	4,66	54	0,5	48	0,19	0,37	9,0	8

<sup>1</sup>M (%) saturação por alumínio=  $Al^{+3} / (Ca^{+2} + Mg^{+2} + K + Al^{+3}) \times 100$ ; CTC=  $Ca^{+2} + Mg^{+2} + K + H + Al$ ; e V(%)= saturação por bases=  $(Ca^{+2} + Mg^{+2} + K) / CTC \times 100$ ; S= enxofre;

<sup>2</sup>Valores seguidos pelas mesmas letras, dentro de uma coluna, não diferiram entre si pelo teste de Wilcoxon ( $p < 0,10$ ).

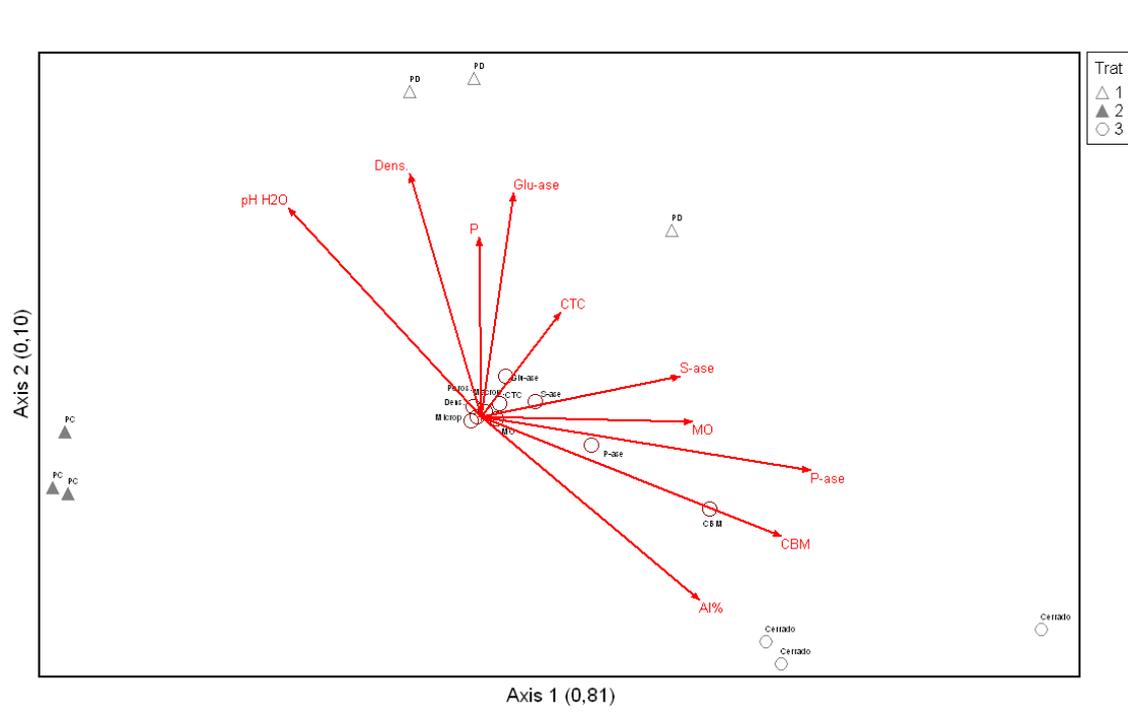
<sup>3</sup> Os tratamentos de rotação lavoura pecuária em negrito indicam o sistema presente na área no momento da amostragem.

Tabela 3 – Propriedades biológicas dos solos na profundidade 0 a 10 cm.

	<b>Biomassa Microbiana</b> mg C kg <sup>-1</sup> solo	<b>Fosfatase Ácida</b> µg p-nitrofenol g <sup>-1</sup> solo h <sup>-1</sup>	<b>Arlisufatase</b> µg p-nitrofenol g <sup>-1</sup> solo h <sup>-1</sup>	<b>β-glicosidase</b> µg p-nitrofenol g <sup>-1</sup> solo h <sup>-1</sup>
	<b>Área I</b>			
PD	147 b <sup>1</sup>	686 b	65 a	116 a
PC	70 b	450 c	39 b	70 b
Cerrado	390 a	1003 a	61 a	79 b
	<b>Área II</b>			
Eucalipto	183 b	1118 b	79 ab	85 a
Carvoeiro	223 b	1452 a	113 a	66 b
Pinus	169 b	541 c	33 c	69 b
Cerrado I	453 a	1171 b	83 ab	76 ab
Cerrado II	454 a	1024 b	109 a	66 b
	<b>Área III</b>			
Pastagem Gramínea.	450	862	77	141
Lavoura/ <b>Pastagem</b> <sup>2</sup>	407	779	136	153
Lavoura	384	622	73	130
Past.Consor./ <b>Lavoura</b> <sup>2</sup>	277	792	101	120
Past. Consorciada	486	1098	131	145
Cerrado	295	1158	82	62

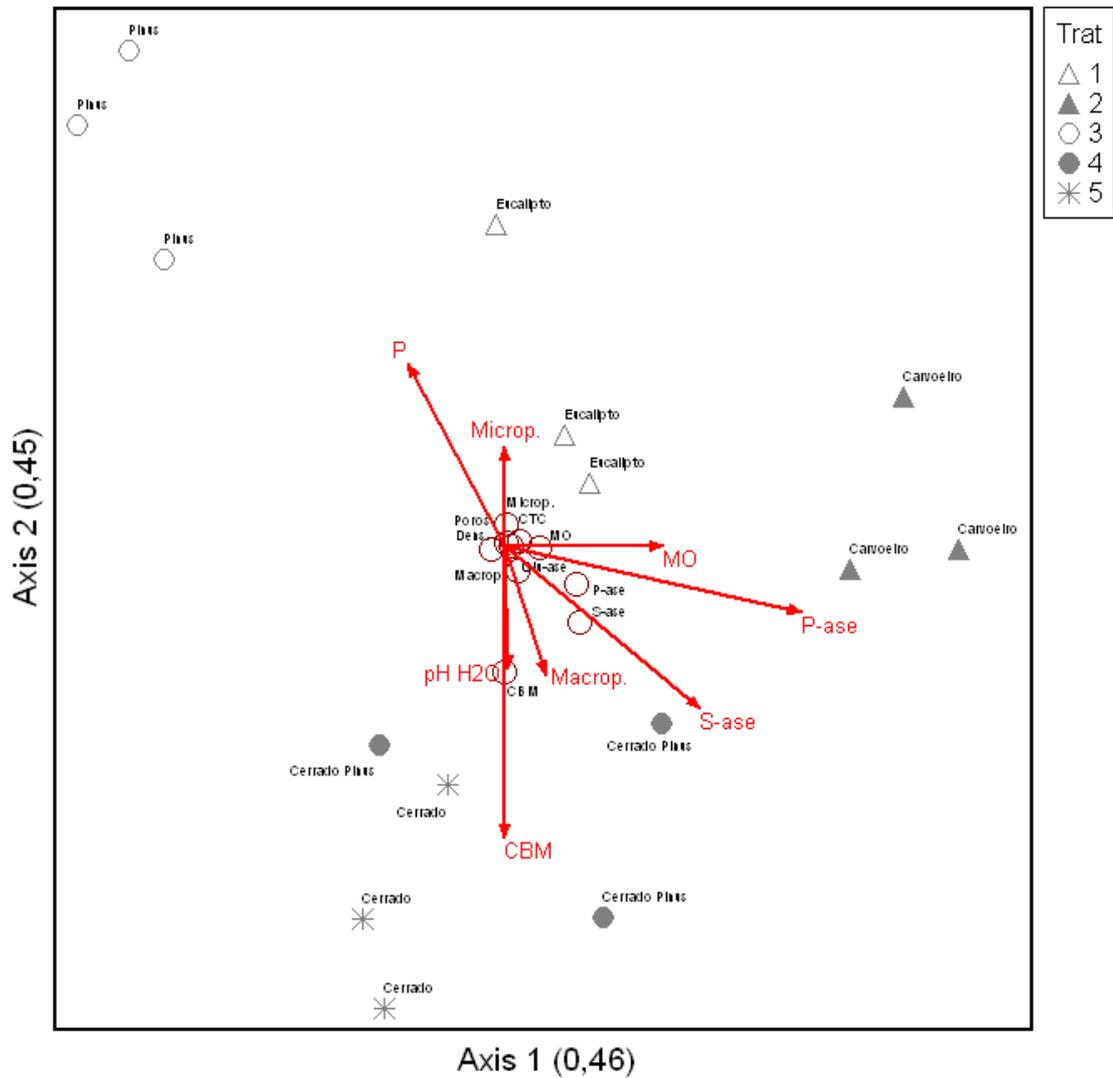
<sup>1</sup> Valores seguidos pelas mesmas letras, dentro de uma coluna, não diferiram entre si pelo teste de Wilcoxon (p<0,10).

<sup>2</sup> Os tratamentos de rotação lavoura pecuária em negrito indicam o sistema presente na área no momento da amostragem.



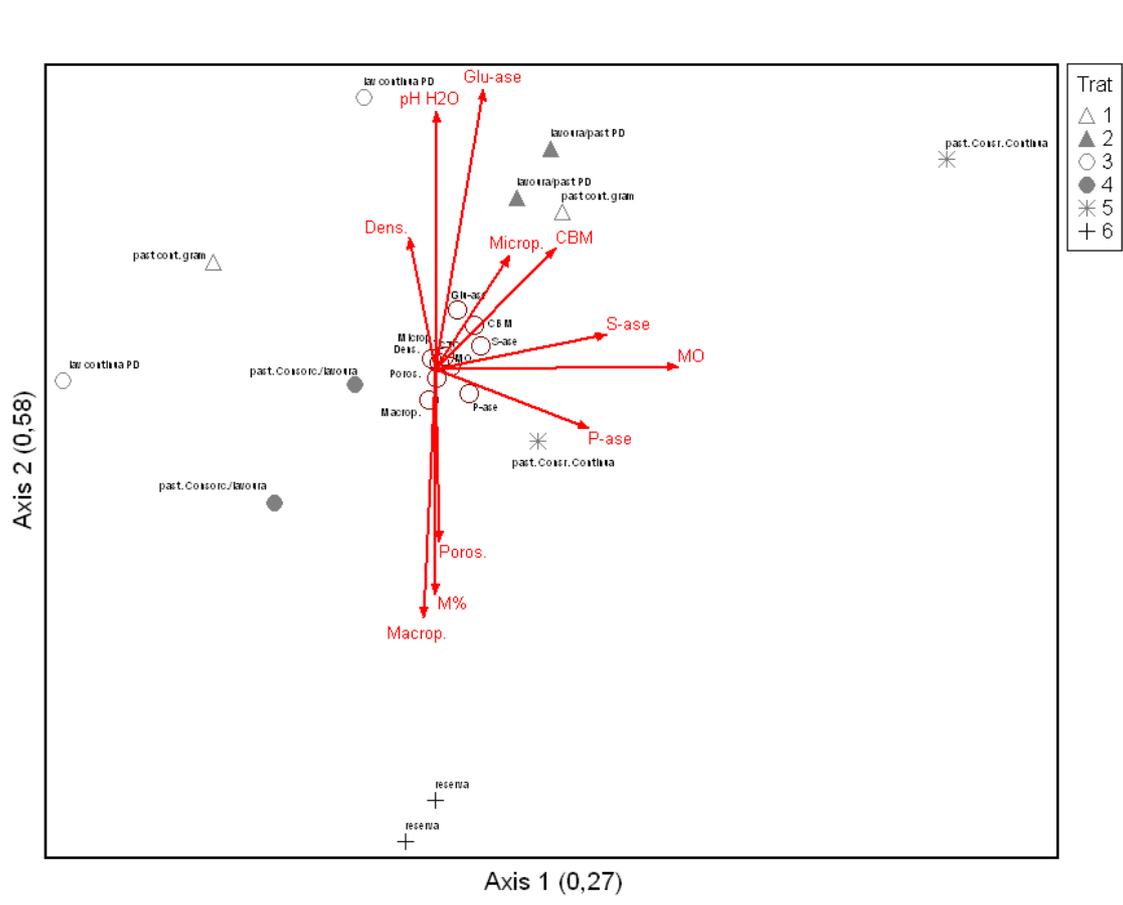
**Figura 1** - Análises de componentes principais (PCA) representando a distribuição dos agroecossistemas na área I de acordo com as similaridades nas propriedades dos solos consideradas na matriz primária.

Legenda: PD= Plantio Direto; PC= Plantio Convencional; Cerrado; CBM= carbono da biomassa microbiana, P-ase= fosfatase ácida, S-ase =arilsulfatase e Glu-ase=  $\beta$ -glicosidase, Den= densidade do solo, MO= matéria orgânica, Al(%)= saturação por alumínio.



**Figura 2** - Análises de componentes principais (PCA) representando a distribuição do plantio de espécies florestais na área II, de acordo com as similaridades nas propriedades dos solos consideradas na matriz primária.

Legenda: Cerrado pinus (vegetação de cerrado próxima á plantação de pinus); Cerrado (vegetação de cerrado próxima ás plantações de eucalipto e carvoeiro); CBM= carbono da biomassa microbiana, P-ase= fosfatase ácida, S-ase =arilsulfatase e Glu-ase=  $\beta$ -glucosidase, MO= matéria orgânica.



**Figura 3** - Análises de componentes principais (PCA) representando a distribuição dos agroecossistemas na área III de acordo com as similaridades nas propriedades dos solos consideradas na matriz primária.

Legenda: 1- PastCtGr= Pastagem Contínua Gramínea Pura ; 2-LavPastPD= Lavoura/Pastagem consorciada; 3- LavCtPD= Lavoura Contínua; 4 - PastCslav= Pastagem consorciada/Lavoura; 5 - PastCsCt = Pastagem Consorciada Contínua; 6 - Reserva = Cerrado Nativo; CBM= carbono da biomassa microbiana, P-ase= fosfatase ácida, S-ase =arilsulfatase e Glu-ase=  $\beta$ -glucosidase

Tabela 4 - Contrastes médios e suas significâncias para os indicadores químicos nas áreas de sistemas integrados lavoura pecuária.

Tratamentos (contrastes)	Matéria orgânica	pH	P	K	S	V(%)
Past Gram × Lavoura	0,32	-0,1	-5,6	-46,5*	-3,8	-12*
Past Cons × Lavoura	0,7 °	-0,2	-5,9	-50,5*	-3,78	-13*
Past Gram × Lav/Pas	0,01	-0,1	-5	-30,5	0	-14*
Past Gram × Past/Lav	0,32	0,4*	-5,7	3,5	-9,6 °	6
Past Cons × Lav/Past	0,39	-0,2	-5,3	-34,5 °	0,02	-15**
Past Cons × Past/Lav	0,7 °	0,3 °	-6	-0,5	-9,6 °	5
Lavoura × Lav/Past	-0,31	0	0,6	16	3,8	-2
Lavoura × Past/Lav	0	0,5*	-0,1	50*	-5,8	18**
Past Cons × Past Gram.	0,38	-0,1	-0,3	-4	0,02	-1
CV (%)	8,2	2,1	75,3	19,3	29,6	8,2

°, \* , \*\* Significância a 10, 5 e 1% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 5 - Contrastes médios e suas significâncias para os indicadores microbiológicos nas áreas de sistemas integrados lavoura pecuária.

Tratamentos (contrastes)	Biomassa Microbiana	Fosfatase Ácida	Arilsulfatase	β-Glicosidase
Past Gram × Lavoura	66	240	4	10
Past Cons × Lavoura	102	476 *	58°	15
Past Gram × Lav/Pas	43	83	-59 °	-12
Past Gram × Past/Lav	173	70	-24	20
Past Cons × Lav/Past	79	319°	-5	-8
Past Cons × Past/Lav	209	306°	30	25,2
Lavoura × Lav/Past	-23	-157	-63°	-23
Lavoura × Past/Lav	107	-170	-28	10
Past Cons × Past Gram	36	236	54 °	5
CV (%)	31,8	16,6	24,5	17,6

°, \* , \*\* Significância a 10, 5 e 1% de probabilidade pelo teste F

Tabela 6 - Contrastes médios e suas significâncias para os indicadores físicos nas áreas de sistemas integrados lavoura pecuária

Tratamento (contrastes)	Densidade do solo	Microporosidade	Macroporosidade	Porosidade Total
Past Gram × Lavoura	0,03	-1,5	-1	-2,5
Past Cons × Lavoura	-0,08	1	3,8	4,7*
Past Gram × Lav/Pas	0,11*	-3,3	-0,5	-3,7
Past Gram × Past/Lav	0,11*	-2,5	-4,8*	-7,2**
Past Cons × Lav/Past	0	-0,8	4,3 <sup>o</sup>	3,5
Past Cons × Past/Lav	0,02	0,5	-1,2	-0,8
Lavoura × Lav/Past	0,08	-1,8	0,5	-1,2
Lavoura × Past/Lav	0,1	-0,5	-5*	-5,5*
Past Cons × Past Gram.	-0,11*	2,5	4,8*	7,2**
CV (%)	7,3	10,2	10,4	4,6

<sup>o</sup>\*, \*\* Significância a 10, 5 e 1% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 7 – Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos químicos, físicos e microbiológicos e os eixos 1 e 2 das análises de componentes principais, nas três áreas de estudo.

Variáveis	Área I		Área II		Área III	
	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 1	Eixo 2
CBM	0,931	-0,591	,165	-,965	0,62	0,637
Fosfatase ácida	0,977	-0,397	,958	-,311	0,717	-0,431
Arilsulfatase	0,759	0,347	,834	-,612	0,742	0,349
β- glicosidase	0,308	0,808	,039	,069	0,381	0,959
Matéria orgânica	0,783	-0,127	,652	,076	0,89	0,116
CTC	0,48	0,554	,434	,262	0,281	0,422
pH	-0,748	0,78	,219	-,582	0,059	0,916
Saturação por Al (M%)	0,796	-0,731	,072	-,049	-0,015	-0,856
Densidade do solo	-0,458	0,842	-,474	-,220	-0,307	0,65
Microporosidade	-0,291	-0,193	,483	,126	0,482	0,613
Macroporosidade	0,071	0,163	,447	-,559	0,141	-0,747

Tabela 8 – Escores de sensibilidade (equivalente ao somatório das distâncias da origem dos eixos 1 e 2) dos atributos químicos, físicos e biológicos utilizados na matriz primária para separar os tratamentos, nas três áreas de estudo.

Variáveis	Área I	Área II	Área III
CBM	0,362	0,1594	0,093
Fosfatase ácida	0,157	0,1116	0,065
Arilsulfatase	0,079	0,1645	0,091
β-glicosidase	0,074	0,0042	0,078
Matéria orgânica	0,019	0,0213	0,021
CTC	0,036	0,0260	0,013
Densidade do solo	0,021	0,0428	0,017
Microporosidade	0,016	0,0253	0,025
Macroporosidade	0,010	0,0002	0,041

## **CAPITULO 2**

### **MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO SOLO EM DIFERENTES AGROECOSSISTEMAS DO CERRADO UTILIZANDO O SOFTWARE SIMOQS.**

Trabalho a ser encaminhado para publicação na Revista Brasileira de Ciência do Solo

# **MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO SOLO EM DIFERENTES AGROECOSSISTEMAS DO CERRADO UTILIZANDO O SOFTWARE SIMOQS.**

## **RESUMO**

Nesse trabalho o software SIMOQS, “Sistema de Monitoramento da Qualidade do Solo”, desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa, foi utilizado para calcular Índices de Qualidade do Solo (IQS) usando atributos químicos (pH, matéria orgânica, teores de P, Ca, Mg, K, CTC e saturação por alumínio), físicos (densidade aparente, porosidade total, macroporosidade e microporosidade) e biológicos (carbono da biomassa microbiana, atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase) e para monitorar, no período de 1998 a 2006, a qualidade do solo sob diferentes sistemas de manejo. Amostras de solo foram coletadas em duas áreas localizadas na Embrapa Cerrados, Planaltina DF: área I) rotação milho/soja sob plantio direto (PD) e plantio convencional (PC), iniciada em 1992 e área II) experimento de sistemas integrados lavoura pecuária, iniciado em 1991. Em cada local, áreas adjacentes sob vegetação nativa de Cerrado foram incluídas no estudo. Funções de pontuação padronizada, valores de linha base e limites inferiores e superiores foram determinados levando-se em conta os aspectos locais relacionados a tipo de solo e as particularidades dos diferentes sistemas de manejo avaliados. O uso do SIMOQS foi eficaz como ferramenta para o monitoramento da qualidade do solo nos diferentes agroecossistemas avaliados. Através dos cálculos do IQS foi possível confirmar os benefícios das pastagens bem manejadas (principalmente quando em consórcio com leguminosas), da rotação lavoura/pastagem e do plantio direto como sistemas de manejo capazes de aumentarem o IQS dos solos de cerrado. O monitoramento do Índice de Qualidade Biológica do Solo (IQBS) no tratamento sob PD da área I mostrou que, ao longo do tempo, têm ocorrido mudanças no solo que implicaram em aumentos nos valores desse índice. Na área II, a comparação dos IQBS determinados em agosto de 1998 e março de 2004 também revelou a ocorrência de aumentos nesse índice, ao longo do tempo, em todos os tratamentos avaliados.

**Palavras-chave:** carbono da biomassa microbiana, atividade enzimática do solo, plantio direto, plantio convencional, pastagens, sistemas integrados lavoura-pecuária.

## SOIL QUALITY MONITORING IN DIFFERENT CERRADO AGROECOSYSTEMS USING THE SIMOQS SOFTWARE

### ABSTRACT

The software SIMOQS, developed at the Viçosa Federal University, was used in the present study to calculate soil quality indexes (SQI) using chemical (pH, organic matter, P, Ca, Mg, K, CEC and Al saturation), physical (bulk density, macro, micro and total porosity) and biological (microbial biomass carbon,  $\beta$ -glucosidase, acid phosphatase, and arylsulfatase activities) indicators and for monitoring soil quality under different management systems from 1998 to 2006. Soil samples were collected to a depth of 10cm in two experimental areas located at Embrapa Cerrados, Planaltina, DF: area 1) corn/soybean rotation under no-tillage (NT) and conventional tillage (CT) initiated in 1992; area 2) an experiment initiated in 1991 where annual cropping systems are integrated with pastures (five treatments were evaluated: continuous grass pasture, continuous legume based pasture, continuous annual cropping systems, annual crops integrated with legume based pasture and legume based pasture integrated with annual crops). Native cerrado fragments adjacent to the two areas were used as references. Standard scoring functions were used for normalization of soil quality indicators. Lower and upper threshold values, as well as baseline values were defined taking into account local aspects such as soil type and the particularities of each management system. SIMOQS was an efficient tool to assess soil quality in the different agroecosystems evaluated. The benefits of pastures (particularly the legume based pasture), annual crops integrated with legume based pastures and of no-tillage systems were confirmed through their greater SQI. The SQI calculated for the treatment under no-tillage in area 1 has increased over time. In area 2 the comparison between the samplings carried out in August 1998 and March 2004 showed that in SQI values also increased over time in all treatments.

**Key words:** microbial biomass carbon, soil enzyme activities, no-tillage, conventional tillage, pastures, lay/farming systems

## 1. INTRODUÇÃO

A qualidade do solo foi definida por Doran & Parkin (1994) como sendo a capacidade do solo funcionar dentro dos limites dos ecossistemas para i) sustentar a produtividade biológica; ii) manter a qualidade ambiental e iii) promover a saúde das plantas e animais. Embora a avaliação da qualidade de um solo seja uma tarefa complexa, sua determinação tem sido sugerida como uma ferramenta importante para acessar a sustentabilidade de longo prazo dos sistemas agrícolas (Hussain et al., 1999). A seleção dos atributos do solo que servirão como indicadores de qualidade de solo, os níveis críticos desses atributos, e como agregá-los em um índice de qualidade são algumas das dificuldades encontradas para quantificar a qualidade do solo (Tótola & Chaer, 2002).

Karlen & Stott (1994) propuseram uma estratégia para avaliar a qualidade do solo baseada na determinação de parâmetros que avaliassem quatro funções específicas do solo: 1) permitir a entrada de água, 2) facilitar a transferência, adsorção e liberação de água; 3) resistir à degradação e 4) servir de suporte para o crescimento das plantas. Vários indicadores associados a cada uma dessas funções são determinados e normalizados para valores entre 0 e 1 usando funções de pontuação padronizada (standard scoring functions, SSFs) de três tipos: a) mais é melhor; b) ótimo e c) menos é melhor. Essas funções são utilizadas para resolver problemas na área de engenharia de sistemas (Wymore, 1993). O escore de cada indicador é calculado após o estabelecimento de limites inferiores e superiores e valores de linha base (ponto médio entre os valores limite de cada propriedade do solo considerada). Os valores limite (inferior e superior) e os da linha base podem ser obtidos na literatura, com base em experimentação, na opinião de especialistas ou podem ser obtidos em solos sob condições próximas às consideradas ideais em locais preservados, ou em culturas específicas. Após a pontuação de todos os indicadores de qualidade do solo, a pontuação de cada uma das funções do solo é obtida pela soma dos produtos dos pesos numéricos e dos escores de seus indicadores associados. Para cada função também é atribuído um peso que multiplica o escore daquela função, originando um sub-índice de performance da função. A soma desses sub-índices origina o IQS, índice de qualidade do solo. Hussain et al (1999) utilizaram o modelo proposto por Karlen & Stott (1994) para avaliar três sistemas de manejo (plantio direto, arado de aiveca e de disco). Os

índices calculados diferiram significativamente e a qualidade do solo avaliada dessa forma mostrou-se mais elevada nas áreas submetidas ao plantio direto.

O modelo para o cálculo do índice de qualidade do solo (IQS) proposto por Karlen & Stott (1994) foi modificado por Chaer (2001) para quantificar o efeito de diferentes manejos na cultura do eucalipto sobre a qualidade do solo. A qualidade do solo foi avaliada considerando-se cinco funções do solo relacionadas a sustentabilidade da atividade florestal: 1) receber, armazenar e suprir água; (2) armazenar, suprir e ciclar nutrientes; (3) promover o crescimento das raízes; (4) promover a atividade biológica e (5) manter a homeostase. Os resultados indicaram que o modelo para a obtenção do IQS foi uma ferramenta efetiva e que as áreas submetidas a sistemas de implantação que prezavam a manutenção da camada orgânica do solo foram as que apresentaram os maiores IQS. As planilhas utilizadas no trabalho de Chaer (2001) constituíram a base para o desenvolvimento do software SIMOQS “Sistema de Monitoramento da Qualidade do Solo” ([www.dpi.ufv.br/~vladmir/simoqs](http://www.dpi.ufv.br/~vladmir/simoqs)) que é uma ferramenta computacional desenvolvida na Universidade Federal de Viçosa. O SIMOQS permite a construção e condução de testes sobre modelos para cálculos de índices de qualidade de solos de forma rápida, com uma interface amigável e que podem ser aplicados a diferentes regiões, culturas e objetivos (Chaer, 2001).

No presente trabalho, o software SIMOQS foi utilizado para auxiliar a interpretação de dois conjuntos de dados relacionando atributos químicos, físicos e biológicos às quatro primeiras das cinco funções do solo propostas por Chaer (2001). Amostras de solo foram coletadas em dois locais: i) rotação milho/soja sob PD e PC, iniciada em 1992 e ii) sistemas integrados lavoura pecuária, iniciados em 1991. Funções de pontuação padronizada, valores de linha base e limites inferiores e superiores foram determinados levando-se em conta os aspectos locais relacionados a tipo de solo e as particularidades dos diferentes sistemas de manejo avaliados. O trabalho objetivou monitorar, no período de 1998 a 2006, a qualidade do solo sob diferentes sistemas de manejo, através do cálculo de índices de qualidade de solo (IQS) utilizando o software SIMOQS.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Descrição das áreas de estudo**

O estudo foi conduzido a partir de dados coletados em dois experimentos localizados no campo experimental da Embrapa Cerrados, Planaltina (DF): área I, rotação milho/soja sob sistemas de Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC), experimento iniciado em 1992 e área II, Sistemas Integrados Lavoura/Pecuária, experimento iniciado em 1991. Na área I, sob PD e PC foram utilizados dados obtidos no período de janeiro de 1998 a fevereiro de 2006 e, na área II, sistemas integrados lavoura/pecuária os dados utilizados correspondem ao período de agosto de 1998 a abril de 2006. Nas duas áreas, até março de 2004 as amostras foram coletadas na profundidade de 0 a 5 cm e a partir dessa data a profundidade de amostragem passou a ser de 0 a 10 cm. Em cada local, áreas adjacentes sob vegetação nativa de Cerrado foram incluídas nas amostragens.

A altitude da região do estudo é em média de 1.175m e as coordenadas geográficas são: 15° 35' 30" de latitude sul e 47° 42' 00" de longitude a oeste de Greenwich. Conforme classificação de Köppen, o clima é do tipo tropical estacional (Aw), com precipitação média de 1.500 mm concentrada no período entre outubro a março. O período seco, definido em termos de déficit hídrico, tem duração de 5 a 6 meses e as médias das temperaturas máximas e mínimas são de 26,4°C e 15,9°C, respectivamente.

#### **2.1.1 Área com Sistemas de Plantio Direto e Plantio Convencional**

As amostragens foram realizadas num experimento iniciado em 1992 em solos sob plantio direto e plantio convencional com delineamento em blocos ao acaso e três repetições em diferentes localidades. Atualmente, apenas o bloco localizado na Embrapa Cerrados vem sendo conduzido. Desta forma, as avaliações do presente estudo foram realizadas nesta repetição do experimento que está localizada num Latossolo Vermelho Amarelo argiloso. Antes de 1992, a utilização desta gleba se deu com culturas anuais (principalmente soja) durante 15 anos, sob sistema de preparo de solo convencional. Essa repetição do experimento consiste de 4 faixas sendo duas com PD (320 m de comprimento por 50 m de largura) e duas com PC (320 m de comprimento por 25 m de largura). Para cada sistema de manejo, uma das faixas consta da sucessão

milho/soja e a outra, soja/milho. As faixas de PD são subdivididas em talhões de 1700 m<sup>2</sup>, onde culturas de cobertura (milheto, *Braquiaria brizantha*, *Braquiaria decumbens*, sorgo e aveia preta) foram plantadas na safrinha (final da estação chuvosa) até o ano de 2004, em sucessão ao milho ou soja. As faixas de PC são mantidas em pousio até o preparo do solo para a safra seguinte, que é realizado com uma aração e duas gradagens. Neste estudo, foram amostrados os seguintes tratamentos: sucessão milho/soja em PD nas parcelas onde o milheto foi usado como cultura de cobertura, sucessão milho/soja em preparo de solo convencional (PC), além de uma área adjacente sob vegetação nativa do tipo cerrado ralo. Para uma melhor representação da variabilidade espacial dos parâmetros, as áreas sob PD, PC e cerrado foram subdivididas em três parcelas de 11 m x 50 m; 11 m x 25 m e 15m x10 m, respectivamente. Os dados apresentados constituem as médias dessas três parcelas.

### **2.1.2 Área com Sistemas Integrados Lavoura/Pecuária**

Nesta área tem-se um experimento, iniciado em 1991, de rotações de culturas anuais com pastagens num Latossolo Vermelho de textura argilosa. Deste experimento, foram selecionados cinco sistemas de uso do solo: pastagem contínua de gramíneas pura (S1), pastagem consorciada contínua (S2), rotação de pastagem consorciada/lavoura (S3P), rotação lavoura/pastagem consorciada (S3L) e lavoura contínua (S4). Além das parcelas com esses tratamentos, são mantidas em áreas adjacentes ao experimento quatro parcelas com a vegetação de Cerrado (S5). Neste estudo essas áreas também foram monitoradas quanto à qualidade do solo.

A seqüência de culturas no tratamento lavoura contínua sob plantio direto, de 1991 até 2006, foi soja-soja-milho-soja-milho-soja-milho-soja-soja-milheto-soja-milheto-soja-soja-sorgo-soja. O capim utilizado nas pastagens consorciadas e de gramínea pura até o ano 2000 foi o *Andropogon gayanus* cv. Planaltina. Na pastagem consorciada plantava-se a leguminosa *Stylosanthes guianensis* cv. Mineirão. A partir do ciclo 1999/2000, o *Andropogon gayanus* das pastagens puras de gramíneas e consorciadas foi substituído pela *Brachiaria decumbens* e nas áreas de sistemas integrados lavoura/pastagem foi introduzido o *Panicum maximum* cv Tanzânia. O intuito desta substituição foi aproveitar a melhoria da fertilidade introduzindo

fornageiras mais produtivas e adaptadas ao período de seca, como a Braquiária. Os ciclos de rotação lavoura/pastagem e pastagem/lavoura são realizados a cada quatro anos sendo que o primeiro ciclo foi iniciado após o quarto cultivo (safra 95/96). O ciclo atual (quarto ciclo) teve início na safra 2004/2005 e seu término ocorreu na safra 2007/2008. Na tabela 1 são apresentados o detalhamento das rotações e a relação de calcário, nitrogênio, fósforo, potássio, micronutrientes e gesso aplicados nesse experimento no período de 1991 a 2006.

## **2.2 Coleta, preparação e armazenamento das amostras**

A coleta das amostras de solo foi realizada com a utilização de um trado holandês. Apenas na amostragem de fevereiro de 2006 foram retiradas amostras indeformadas em anéis volumétricos para a determinação da densidade do solo e porosidade. Nessa amostragem, também foram coletadas amostras deformadas para análises de caracterização química do solo. Em todas as demais épocas, amostras deformadas foram retiradas para análises biológicas. Para a realização da amostragem nos tratamentos sob PD e PC da área I e nos tratamentos sob lavoura da área II, foi utilizado o esquema proposto por Nicolodi et al. (2002) onde a amostragem é realizada em 10 pontos, perpendicularmente à linha de plantio sendo que em cada ponto de amostragem são realizados cinco furos (um furo no centro da linha de plantio, mais dois de cada lado). Nas áreas sob pastagens e nos fragmentos de cerrado utilizados como referência, os 10 pontos de amostragem em cada parcela foram escolhidos aleatoriamente.

As subamostras foram homogeneizadas e colocadas em saco plástico para serem transportadas ao laboratório de Microbiologia do Solo da Embrapa Cerrados, onde foram passadas por uma peneira de malha 4 mm e armazenadas a uma temperatura de 7° C a 10° C até o momento da realização dos ensaios. Resíduos de plantas e raízes foram removidos cuidadosamente antes da realização dos ensaios microbiológicos. Determinações de umidade do solo foram efetuadas pelo método gravimétrico, secando-se parte das amostras em estufa a 100°C por 72 horas antes e após a limpeza de resíduos vegetais, principalmente raízes.

### **2.3 Análises Microbiológicas, Químicas e Físicas**

Para realizar as análises de carbono da biomassa microbiana do solo (CBM), até o ano de 2003 foi utilizado o método CFI- Clorofórmio fumigação-incubação (Jenkinson & Powlson, 1976) e, a partir de 2004, utilizou-se o método CFE – Clorofórmio fumigação-extração proposto por Vance et al. (1987).

Para as determinações de atividade enzimática do solo foram avaliadas a  $\beta$ -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase, de acordo com os métodos descritos por Tabatabai (1994), que se baseiam na determinação colorimétrica do p-nitrofenol liberado por essas enzimas, quando o solo é incubado com uma solução tamponada de um substrato específico para cada enzima avaliada.

Foram analisados ainda a matéria orgânica, o pH, Saturação por Al, Saturação por base, acidez potencial, P, K, Ca, Mg e S segundo Embrapa (1979). Com relação aos indicadores físicos foram determinadas a densidade do solo, microporosidade, macroporosidade, porosidade total e densidade real, porém apenas a densidade do solo participou do cálculo do IQS. Esses dados correspondem a uma única amostragem, realizada em fevereiro de 2006.

No monitoramento de 1998 a 2006, nas áreas de PD e PC e de integração lavoura e pecuária, somente os atributos biológicos foram utilizados no cálculo do IQS. Ou seja, com exceção do IQS calculado em fevereiro de 2006 que integra os atributos químicos, físicos e biológicos observados nas mesmas amostras de solo, os demais índices, por utilizarem apenas a combinação dos indicadores biológicos, serão referidos como índices de qualidade biológica do solo (IQBS).

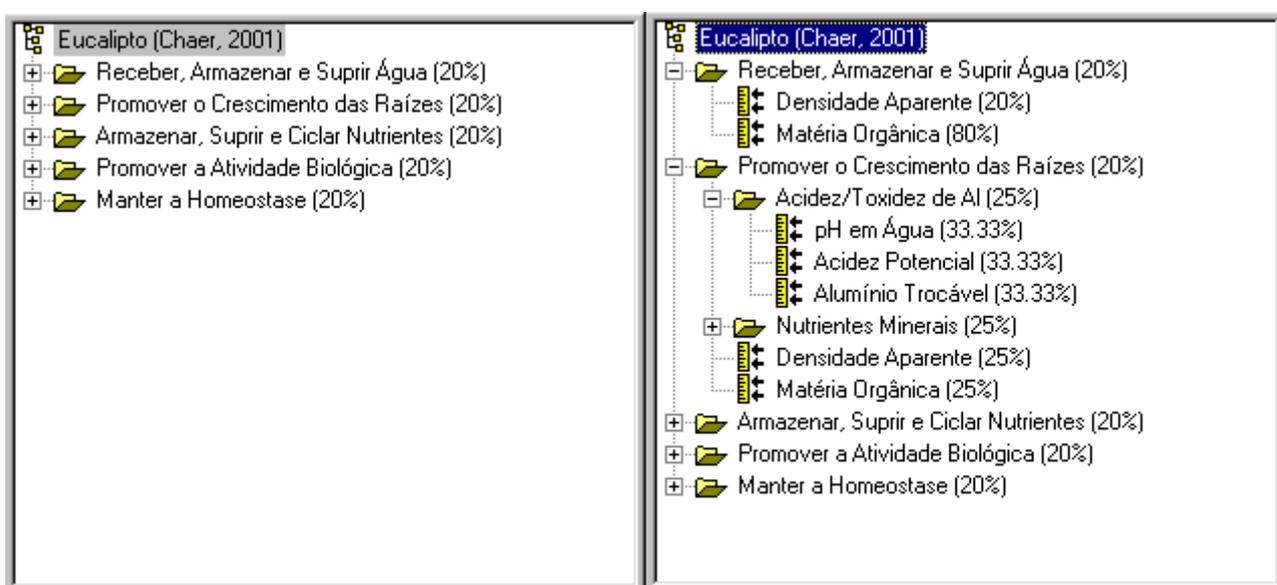
As tabelas 2, 3, 4 e 5 apresentam os valores dos atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo utilizados nos cálculos do IQS.

### **2.4 Uso do software SIMOQS – Sistema de Monitoramento da Qualidade do Solo**

Neste estudo, os atributos biológicos, físicos e químicos foram relacionados com quatro funções do solo através da utilização do programa de computador, SIMOQS – Sistema de Monitoramento da Qualidade do Solo (Chaer, 2001). As funções selecionadas foram: 1) receber, armazenar e suprir água; (2) armazenar, suprir e ciclar nutrientes; (3) promover o crescimento das raízes; e (4) promover a atividade biológica. Cada função está associada a um peso numérico, expresso em porcentagem, que

determina o seu peso dentro do modelo. No presente estudo, adotou-se pesos numéricos de igual importância para cada função no valor de 25%.

O SIMOQS possui um editor de modelos que torna possível a definição de indicadores à livre escolha do usuário e permite construir modelos testes de uma forma simples e rápida. No programa, cada modelo é estruturado na forma de uma árvore (Chaer et al., 2004). A figura 1 exibe um exemplo, com o primeiro nível de particularidade das funções e a figura 2 o detalhamento dos níveis do mesmo modelo. Cada nodo (nó) do modelo tem seu próprio peso. Os nodos intermediários são as funções e os outros nodos são os indicadores.



**Figura 1:** Primeiro nível de detalhamento de um modelo.

**Figura 2:** Visualização de vários níveis de detalhamento.

Neste estudo foram elaborados três modelos específicos: i) culturas anuais e pastagens exigentes em fertilidade, ii) pastagens pouco exigentes em fertilidade de solo e iii) Cerrado sentido restrito com baixo nível de antropização, utilizado para monitorar os fragmentos de Cerrado nativo próximos às duas áreas experimentais.

Os indicadores de qualidade do solo são os atributos químicos, físicos e biológicos escolhidos e mensurados nos solos das áreas avaliadas. Os indicadores são os itens que realmente importam na definição dos modelos para o cálculo de IQS (Borges et al., 2005), pois é o peso de cada indicador dentro de cada função que é usado no cálculo. Um mesmo indicador pode aparecer mais de uma vez em diferentes funções, pois os atributos do solo estão inter-relacionados, tornando necessárias estas repetições

para representar melhor cada função no modelo. Assim, por exemplo, o indicador físico densidade do solo está presente tanto na função “receber, armazenar e suprir água” quanto na função “promover o crescimento das raízes” já que tem uma influência direta no funcionamento do solo relacionada com estas respectivas funções.

A definição dos pesos numéricos associados aos indicadores e às funções do solo para determinação do índice de qualidade do solo (IQS) referente ao ano de 2006 e dos IQBS, nas demais épocas avaliadas, foi feita de forma subjetiva e é apresentada nas tabelas 6 e 7. Para facilitar essa distribuição, alguns indicadores, os chamados “indicadores de nível 1”, foram constituídos pela divisão em “indicadores nível 2”. Por exemplo, o indicador de nível 1 “atividade da biomassa microbiana” foi estratificado no Carbono da Biomassa Microbiana e nas atividades das enzimas  $\beta$ -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase (indicadores de nível 2). Os valores dos pesos atribuídos aos indicadores dentro das funções basearam-se não só em referências da literatura e trabalhos científicos, mas principalmente na opinião de especialistas das áreas de química, física e microbiologia do solo.

Conforme detalhado por Chaer (2001), o procedimento para o cálculo do IQS é relativamente simples. Cada função está associada a um conjunto de indicadores de qualidade do solo e para cada indicador é dado um valor normalizado por meio de funções de pontuação padronizadas (SSFs), sendo transformados em escores de indicadores (EI's), que variam de 0 a 1 (próximo de 1 indicam correlação positiva dos valores de referência, atribuídos nos modelos, em relação aos valores obtidos das áreas de estudo que foram inseridos no banco de dados do software). Os EI's são então multiplicados por um peso relativo à importância atribuída a cada indicador e o somatório dos produtos dessa multiplicação gera os escores das funções (EF's). Da mesma maneira, para cada função é dado um peso de importância (PF) que é o multiplicador dos EF's (escores de função) originando um sub-índice que constitui o índice de performance da função do solo. Por fim, a soma desses sub-índices origina o IQS que compreende valores entre 0 (zero) e 100. Toda a estrutura de um modelo construído no SIMOQS é mostrada na tabela 8.

O somatório dos pesos das funções (PF's) e dos pesos de todos os indicadores associados a uma única função (PI's) é igual a 1.

## 2.5 Padronização e Normalização dos valores dos indicadores de qualidade

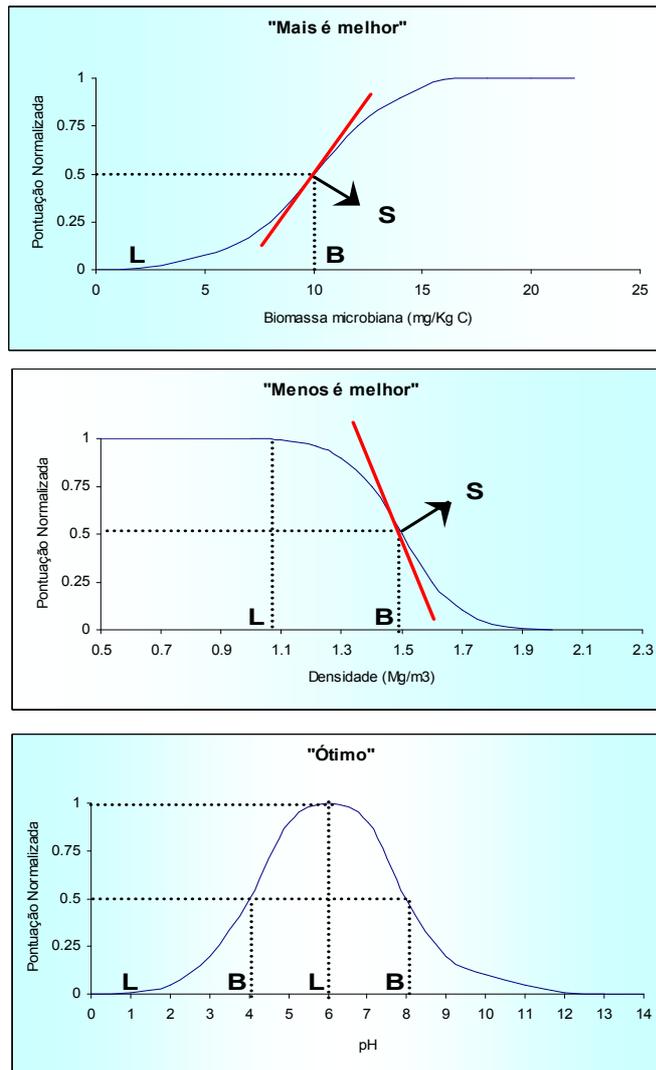
Conforme proposto por Karlen & Stott (1994), no SIMOQS os valores dos indicadores são normalizados entre 0 e 1 usando as funções padronizadas de pontuação (standard scoring functions, SSFs) propostas por Wymore, (1993). Esse procedimento é descrito em detalhes por Chaer (2001). Para a padronização dos valores dos indicadores de qualidade usados no modelo são geradas curvas de pontuação padronizadas através da função sigmoideal (Wymore, 1993):

$$PP = \frac{1}{1 + ((B - L)/(x - L))^{2S(B+x-2L)}}$$

onde, PP é a pontuação padronizada do indicador; B é o valor na linha-base da propriedade do solo, em que a pontuação equivale a 0,5; L é o limite inferior (valor da pontuação igual a zero quando a curva é do tipo “mais é melhor” ou igual a um quando a curva é do tipo “menos é melhor”); S é a inclinação da tangente da curva na linha-base e x é o valor do indicador.

As funções de pontuação podem gerar três tipos de curvas (figura 3):

- (1) “mais é melhor” – valor S positivo. Exemplo: Biomassa Microbiana
- (2) “menos é melhor” – valor S negativo. Exemplo: Densidade do solo
- (3) “ótimo” – Exemplo: pH do solo



**Figura 3** – Tipos de curvas de pontuação padronizada usados para normalização dos indicadores usados no cálculo do IQS.

(L – limite inferior; B – linha base; S – valor da tangente em B)

Fonte: Chaer et al. (2004).

Neste estudo, para os indicadores densidade do solo, concentração de alumínio e acidez potencial, as curvas de pontuação foram definidas como sendo do tipo “menos é melhor”, onde as formas dessas curvas foram determinadas por um valor negativo da tangente na linha base. As curvas dos demais indicadores foram definidas como sendo do tipo “mais é melhor”, exceto o pH para o qual foi definida uma curva do tipo “ótimo”.

Para os atributos de química de solo, os valores dos limites inferiores, superiores e ótimo que determinam a forma das curvas de pontuação foram definidos com base na literatura (Sousa & Lobato, 2004). Para os atributos de biologia de solo, os valores dos limites superiores foram calculados tomando-se a maior média observada

nos tratamentos multiplicada por 1,5. Para o cálculo dos limites inferiores desses mesmos atributos, multiplicou-se a menor média observada nos tratamentos por 0,5. Conforme mencionado anteriormente, no presente estudo foram construídos três modelos parametrizados em função do tipo de planta presente na área, no momento da amostragem de solo. Os valores dos parâmetros das funções de pontuação padronizada dos indicadores de qualidade de solo são apresentados nas tabelas 9, 10 e 11.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os IQS e IQBS calculados para os tratamentos da área I, rotação soja/milho sob plantio direto e plantio convencional, e área II, sistemas de integração lavoura pecuária são apresentados nas tabelas 12 e 13.

Na área I, com exceção da avaliação realizada em agosto de 2000, em todas as demais, os IQBS e IQS do PD foram em média 3,3 vezes maiores que os obtidos no tratamento PC (Tabela 12). Os IQBS e IQS do cerrado nativo foram, em média 1,6 e 5,4 vezes superiores aos das áreas sob PD e PC. Hussain et al. (1999) obtiveram resultados semelhantes em estudos que também envolviam a comparação entre PD e PC. O menor revolvimento do solo no PD resulta em maior acúmulo de resíduos orgânicos e nutrientes na sua camada superficial favorecendo, de uma maneira geral, a melhoria nos atributos biológicos, os quais podem ser verificados através de aumentos no carbono da biomassa microbiana e principalmente nos níveis de atividade enzimática (Tabela 2). Esses aumentos, por sua vez, se refletiram em maiores IQBS e IQS.

Na área II, sistemas integrados lavoura/pecuária, considerando-se os valores dos IQBS determinados em agosto de 1998, janeiro de 1999, janeiro de 2000 e março de 2004 (Tabela 13), verifica-se que a área sob cerrado nativo apresentou o maior valor de IQBS (média de 12,4); o tratamento sob pastagem consorciada foi o que apresentou a maior média entre as áreas cultivadas (média de 9,8) seguido pela pastagem de gramínea (média de 7,2). Os demais tratamentos: lavoura contínua, rotação pastagem/lavoura e rotação lavoura/pastagem apresentaram valores médios de IQBS de 5,1; 5,5 e 5,9, respectivamente. A inclusão dos parâmetros de física e química de solo na amostragem realizada em 2006 permitiu o cálculo do IQS. Nessa avaliação os tratamentos foram separados em dois grupos: o primeiro, com valores de IQS superiores a 35, incluiu o cerrado nativo, o sistema de pastagem consorciada contínua (tratamento

que obteve o maior IQS), os tratamentos com rotação lavoura/pastagem consorciada e a pastagem contínua de gramíneas. O segundo grupo, com valores de IQS inferiores a 35, englobou o sistema com lavoura contínua sob plantio direto e a rotação pastagem/lavoura. Os maiores valores de IQS nas pastagens contínuas, principalmente na pastagem consorciada com leguminosas, demonstram o impacto positivo na qualidade do solo das pastagens bem manejadas o que pode ser atribuído à ausência de revolvimento do solo, alta densidade radicular e ao acúmulo de serrapilheira nas pastagens. Robertson et al. (1993) também destacam que, nas pastagens, as entradas de C na forma de serrapilheira, raízes e exsudatos radiculares são contínuas durante o ano inteiro, enquanto nas áreas sob cultivo anual essas entradas ocorrem apenas durante o período chuvoso. Esse é um dado muito importante, principalmente se considerarmos que mais de 50% das áreas de pastagens na região do cerrado encontra-se em algum estágio de degradação. Wienhold et al. (2004) compararam vários sistemas de manejo e também observaram, através do cálculo de um IQS, que a pastagem fertilizada e bem manejada foi o sistema que apresentou o maior IQS seguida em ordem decrescente pelos seguintes sistemas de manejo: pastagem com moderada carga animal; pastagem sem animais; pastagem com alta carga de animais; cultura anual sob plantio direto e por último, cultura anual sob plantio convencional, que apresentou o menor IQS.

A incorporação dos atributos de química e física de solo resultando no cálculo do IQS revelou um fato interessante que não foi observado com o IQBS. Na amostragem realizada em 2006, o IQS da rotação lavoura/pastagem (42,9) foi superior ao do tratamento pastagem/lavoura (26,2) que não diferiu do tratamento lavoura contínua (28,2). Além do fato de as espécies de capim nas pastagens terem variado nas duas rotações e da seqüência de culturas anuais também ter variado, outro fator que interferiu nesse resultado foi a maior entrada de fertilizantes, na rotação lavoura/pastagem (Tabela 1) resultando em melhores condições de fertilidade de solo nesse tratamento (maior pH e maiores teores de K, Ca e Mg) comparativamente à rotação pastagem/lavoura (Tabela 4). A melhoria nas condições de fertilidade do solo influenciou o cálculo do IQS e possibilitou verificar os benefícios da integração dos sistemas lavoura/pecuária.

Vários trabalhos da literatura têm utilizado a estratégia proposta por Karlen & Stott (1994) para o cálculo de índices de qualidade de solo. Por exemplo, Karlen et al. (1994 a) compararam tratamentos sob plantio direto com diferentes entradas de resíduos vegetais; Karlen et al. (1994 b) e Hussain et al. (1999) compararam sistemas de plantio

direto e plantio convencional; Glover et al. (2000) compararam sistemas de cultivo orgânico e convencional em pomares de maçã; Chaer (2001) comparou diferentes métodos de manejo durante a fase de reforma de povoamentos de eucalipto e Wienhold et al. (2004) compararam pastagens (sem animais e com alta, moderada e baixa carga animal) e culturas anuais sob plantio direto e plantio convencional. Uma outra utilização dos índices de qualidade de solo é o monitoramento dos sistemas de manejo, permitindo avaliar, ao longo do tempo, se a qualidade do solo está se mantendo, aumentando ou diminuindo (Wienhold et al., 2004). O monitoramento dos IQBS no tratamento sob PD da área I mostra que, ao longo do tempo, têm ocorrido mudanças no solo que implicaram em aumentos nos valores desse índice. Na área II, a comparação dos IQBS determinados em agosto de 1998 e março de 2004 também revelou a ocorrência de aumentos nesse índice, ao longo do tempo, em todos os tratamentos avaliados.

Os resultados obtidos mostram que o uso do SIMOQS foi eficaz como ferramenta para o monitoramento da qualidade do solo em diferentes agroecossistemas e que o cálculo dos IQBS e IQS permite diferenciar os sistemas de manejo com relação a seus efeitos na qualidade do solo. O IQS é uma ferramenta que permite avaliar o efeito de diferentes formas de manejo do solo integrando um conjunto mínimo de atributos químicos, físicos e biológicos. À medida que houver um consenso sobre quais os atributos deverão fazer parte desse conjunto mínimo de dados, da padronização das metodologias utilizadas na sua determinação e dos procedimentos para coleta e armazenamento das amostras de solo, será possível desenvolver e gerar valores numéricos que quantifiquem a qualidade do solo e que sejam eficientes não só para comparar diferentes sistemas de manejo, mas também para monitorá-los ao longo do tempo. Igualmente importante nesse processo será a condução de estudos que permitam um melhor ajuste dos modelos de referência, bem como dos pesos e valores de cada indicador nesses modelos.

#### **4. CONCLUSÃO**

1. O uso do SIMOQS foi eficaz como ferramenta para o monitoramento da qualidade do solo nos diferentes agroecossistemas avaliados.
2. Através dos cálculos do IQBS e IQS foi possível confirmar os benefícios das pastagens bem manejadas (principalmente quando em consórcio com leguminosas), da rotação lavoura/pastagem e do plantio direto como sistemas de manejo capazes de melhorarem a qualidade dos solos de cerrado.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quantificar a qualidade do solo é uma tarefa complexa cuja abordagem tem evoluído muito desde os primórdios da década de 90 quando o debate sobre o tema se intensificou. Juntamente com a conscientização da importância da qualidade do solo para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, veio também o interesse crescente nas propriedades biológicas do solo e no uso de parâmetros biológicos, os biondicadores, para detectar com mais antecedência, alterações que ocorrem no solo em função do seu uso e manejo. Por constituírem a parte viva e mais ativa da matéria orgânica do solo os microrganismos possuem mais sensibilidade para detectar com antecedência mudanças que ocorrem no solo em função de diferentes sistemas de manejo, mudanças essas que podem acarretar perdas, ganhos ou implicar na manutenção da qualidade do solo.

No capítulo 1, o uso do carbono da biomassa microbiana (CBM) e da atividade de algumas enzimas do solo ( $\beta$ -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase) possibilitou avaliar como sistemas de manejos tão distintos englobando sistemas com culturas anuais, pastagens e sistemas florestais influenciam o funcionamento biológico do solo. A presença desses indicadores entre os parâmetros com maior sensibilidade para diferenciar os agroecossistemas avaliados reforçou a importância da inclusão dos mesmos nos estudos de qualidade de solo. Além dessas vantagens, o fato de que esses indicadores, especialmente as enzimas do solo, são de determinação analítica simples e barata e possuem distribuição universal, também os habilitam para fazer parte de um conjunto mínimo de atributos para avaliação da qualidade de solo, uma vez que eles satisfazem os critérios propostos por Halloway & Stork (1991) para um bom indicador de qualidade de solo.

Tão importante quanto consenso em relação a definição do conceito de qualidade do solo (Doran & Parkin, 1994) foi a abordagem proposta por Karlen & Stott (1994) para combinar em um único índice, denominado Índice de Qualidade de Solo, todos os atributos químicos, físicos e biológicos que pudessem vir a serem utilizados para quantificar a qualidade do solo. O desenvolvimento do software SIMOQS a partir da tese de mestrado de Chaer (2001), transformando a complexa abordagem matemática proposta por Karlen & Stott (1994) em uma ferramenta computacional com uma interface amigável permitindo a construção e condução de testes sobre modelos para cálculos de índices de qualidade de solos de forma simples, eficiente e rápida foi também um outro grande avanço nos estudos de qualidade de solo. Longe da pretensão

de representar um consenso, a abordagem utilizada para os cálculos do IQS e os resultados numéricos obtidos no capítulo 2 constituem antes de tudo subsídios para o início de uma longa discussão técnica e filosófica sobre:

- i) quais os atributos devem fazer parte de um conjunto mínimo de dados para avaliar a qualidade de solo,
- ii) como padronizar as metodologias utilizadas na sua determinação e os procedimentos para coleta e armazenamento das amostras de solo
- iii) como melhor ajustar modelos de referência para cada sistema de manejo/cultura avaliada definindo os pesos e valores de cada função/indicador nesses modelos e levando em consideração os aspectos locais, principalmente aqueles relacionados a tipo de solo.

Conforme destacado por Chaer (2001) o estudo da qualidade do solo implica na avaliação de um grande número de características, que além de gerarem um grande volume de dados, geram também muitas dificuldades na interpretação dos mesmos, pois é comum a ocorrência de tendências divergentes entre os indicadores. A título de exemplo esse autor cita que em solos que sofrem adubações químicas/calagem a rápida melhoria nos atributos químicos, para o desenvolvimento das plantas cultivadas, é acompanhada simultaneamente por uma drástica redução nos aspectos relacionados à biologia do solo, tais como carbono da biomassa microbiana, que não são passíveis de reconstituição no curto/médio prazo. A compatibilização dessas questões, a inclusão do componente econômico relacionado à produtividade das culturas nos cálculos de IQS e a própria forma de utilização desses índices são aspectos importantes que também deverão ser objeto de muita discussão e estudos futuros. Uma certeza porém permanece conforme destacado por Mendes & Reis Junior (2004), a de que a busca por práticas agrícolas que proporcionem altas produtividades, mas que também levem em consideração os diversos aspectos relativos à qualidade ambiental é uma equação complexa cuja resolução não pode, definitivamente, negligenciar o componente biológico do solo, pois este apresenta uma estreita inter-relação com os componentes físicos e químicos, os quais irão em conjunto influenciar não só a produtividade das culturas mas também a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Para finalizar, uma questão levantada por Haberern no famoso livro azul da qualidade do solo de Doran et al. (1994), que deve nortear as abordagens adotadas para avaliar e acessar a qualidade do solo: o bom funcionamento do solo é essencial para a

vida de todas as criaturas do planeta Terra, ao cultivá-los para a produção de alimentos, fibras e mais recentemente, agroenergia, qual o legado que estaremos deixando para as gerações futuras: desertos ou jardins?

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORGES, A.C.; CHAER, G.M.; NEVES, J.C.L.; TÓTOLA, M.R.; LOBATO, M.C.C. & DI LORIO, V.O. SIMOQS – Sistema de Monitoramento da Qualidade do Solo. In: [http:// www.dpi.ufv.br/~vladimir/simoqs/index.htm](http://www.dpi.ufv.br/~vladimir/simoqs/index.htm) , acessado em 02/12/05.

CHAER, G.M. **Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos.** Viçosa/Departamento de Microbiologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2001. (tese de Mestrado)

CHAER, G.M.; TÓTOLA, M.R.; LOBATO, M.C.C. & Di LORIO, V.O. **SIMOQS – Sistema de Monitoramento da Qualidade do Solo.** Manual do Usuário. Versão 1.0 – 2004.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. **Manual de métodos de análise do solo.** Rio de Janeiro: EMBRAPA/SNLCS, 1979.

GLOVER, J.D.; REGANOLD, J.P. & ANDREWS, P.K. Systematic method for rating soil quality of convencional, organic and integrated apple orchards in Washington State. **Agric. Ecosys. Environ.**, 80: 29-45. 2000.

HUSSAIN, I; OLSON, K.R.; WANDER, M.M. & KARLEN, D.L. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. **Soil & tillage Research**, 50, p. 237-249. 1999.

JENKINSON, D.S. & POWLSON, D.S. The effect of biocidal treatments on metabolism in soil. V. A method of measuring soil biomass. **Soil Biol. & Biochem.** v 8, pp 209-213, 1976.

KARLEN, D.L. & STOTT, D.E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.R.; STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, **Soil Science Society of America**, p. 53-72, 1994. (Special Publication, 35)

KARLEN, D.L., WOLLENHAUPT, N.C., ERBACH, D.C., BERRY, E.C., SWAN, J.B., EASH, N.S. & JORDAHL, J.L. Crop residue effect on soil quality following 10-years of no-till corn. **Soil Tillage Res.** 31, p 149-167. 1994a.

KARLEN, D.L., WOLLENHAUPT, N.C., ERBACH, D.C., BERRY, E.C., SWAN, J.B., EASH, N.S. & JORDAHL, J.L. Long-term tillage effects on soil quality. **Soil Tillage Res.** 32, p 313-327. 1994b

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I. & SALET, R.L. Alternativa à coleta de uma secção transversal, com pá de corte, na largura da entrelinha, na amostragem do solo em lavouras com adubação em linha no sistema plantio direto". **Revista Plantio Direto** Maio/Junho de 2002, pp.22- 28.

ROBERTSON, F.A.; MYERS, R.J.K.; SAFFIGNA, P.G. Carbon and Nitrogen mineralization in cultivated and grassland soil on subtropical Queensland. **Aust. J. Soil Res.** 31: 611-619. 1993.

SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E. (Eds). Cerrado: correção do solo e adubação. Planaltina, DF: Embrapa-CPAC, p. 147-168, 2004.

TABATABAI, A. Soil Enzymes. In: WEAVER, R.W.; ANGLE, J.S. & BOTTOMLEY, P.S. (Eds). Methods of Soil Analyses. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties, second ed. **Soil Science Society of America**, Madison, WI, USA, pp 775-833, 1994.

TÓTOLA, M.R. & CHAER, G.M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: **Tópicos em Ciência do Solo** – publicação da Sociedade Brasileira de Ciências do Solo – vol. 1. Viçosa – MG, 2: 105-276, 2002.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C. & JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 19, p. 703-707, 1987.

WIENHOLD, B.J.; ANDREWS, S.S.; KARLEN, D.L. Soil quality: a review of the science and experiences in the USA. **Environmental Geochemistry and Health** 26: 89-95, 2004

WYMORE, A.W. Model-Based systems engineering: An Introduction to the mathematical theory of discrete systems and to the tricategory theory of system design. CRC, Boca Raton, FL, 1993.

**Tabela 1** – Detalhamento das rotações e relação de calcário, nitrogênio, fósforo, potássio, micronutrientes e gesso aplicados no experimento de rotação de culturas anuais-pastagem no período 1991-2006.

Ano-culturas	Calcário					Gesso <sup>2</sup>				
	..t/ha...	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Micros <sup>1</sup>	..t/ha...				
<b>Culturas anuais</b>										
1991-soja cv. Doko	5,8	-	98	98	63	2,8				
1992-soja cv. Siriema	-	-	100	100	-	-				
1993-milho BR 2001	-	80	100	60	2*	-				
1994-soja cv. Savana	-	-	100	100	-	-				
1995-milho cv. BR 205	-	80	100	100	22	-				
1996-soja cv. Savana	-	-	90	90	-	-				
1997-milho cv. BR 205	-	70	102	61	1,6*	-				
1998-soja cv. Celeste	-	-	83	83	1,2**	-				
1999-soja cv. Milena	1,7	-	100	100	-	-				
2000-milho cv. "CPAC"	-	5	50	45	-	-				
2001-soja cv Nina	-	-	100	100	-	-				
2002-milho cv. "CPAC"	-	-	-	-	-	-				
2003-soja cv. Raimunda <sup>5</sup>	-	-	100	100	-	-				
2004-soja cv. Emgopa 313	-	10	100	90	-	-				
2005-sorgo BR 304	-	63	71	71	-	-				
2006-soja cv. Valiosa	1,1	-	103	103	-	-				
2007-Soja Valiosa										
<b>Total</b>	<b>8,6</b>	<b>308</b>	<b>1397</b>	<b>1301</b>	<b>89,8</b>	<b>2,8</b>				
<b>Rotação lavoura/pasto - Iniciando com lavoura</b>										
1991-soja	5,8	-	98	98	63	2,8				
1992-soja	-	-	100	100	-	-				
1993-milho	-	80	100	60	2*	-				
1994-soja	-	-	100	100	-	-				
1995 - Andropogon	-	-	-	-	-	-				
1996 - Andropogon <sup>4</sup>	-	-	-	-	-	-				

Continuação da Tabela 1

1997 - Andropogon	-	-	20	20	-	-
1998 - Andropogon	-	-	-	-	-	-
1999-soja	1,7	-	100	100	-	-
2000-milheto	-	5	50	45	-	-
2001-soja	-	-	100	100	-	-
2002-milheto	-	0	0	0	-	-
<b>2003 - Soja + Marandu <sup>7</sup></b>		-	100	100	-	-
2004 - Marandu	-	-	-	-	-	-
2005 - Marandu	-	-	-	-	-	-
2006 - Marandu	1,1	-	-	-	-	-
2007 - Soja cv. Valiosa		-	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>8,6</b>	<b>85</b>	<b>768</b>	<b>723</b>	<b>65</b>	<b>2,8</b>
<b>Rotação pasto/lavoura - Iniciando com pastagem</b>						
1991 - Andropogon	5,8	-	90	-	30	-
1992 - Andropogon	-	-	-	-	-	-
1993 - Andropogon	-	-	-	-	-	-
1994 - Andropogon	-	-	-	-	-	-
1995-milho	-	80	100	100	22	-
1996-soja	-	-	90	90	-	-
1997-milho	-	70	102	61	1,6*	-
1998-soja	-	-	83	83	1,2**	-
1999 - Tanzânia	1,7	-	16	16	-	-
2000 - Tanzânia	-	-	-	-	-	-
2001 - Tanzânia	-	-	-	-	-	-
2002 - Tanzânia	-	40	30	30	-	-
2003 - Tanzânia	-	-	-	-	-	-
2004-soja Emgopa 313	-	10	100	90	-	-
2005-sorgo <sup>6</sup> BR 304		63	71	71	-	-
2006soja cv. Valiosa rr	1,1	-	103	103	-	-
2007 - Capim-Piatã		-	-	-	-	-

Continuação da Tabela 1

<b>Total</b>	<b>8,6</b>	<b>263</b>	<b>785</b>	<b>644</b>	<b>54,8</b>	<b>0</b>
<b>Pastagens contínuas<sup>3</sup></b>						
1991 - Andropogon	5,8	-	90	-	30	-
1992 - Andropogon	-	-	-	-	-	-
1993 - Andropogon	-	-	-	-	-	-
1994 - Andropogon	-	-	20	20	-	-
1995 - Andropogon	-	-	20	20	-	-
1996 - Andropogon	-	-	-	-	-	-
1997 - Andropogon	-	-	20	20	-	-
1998 - Andropogon	-	-	-	-	-	-
1999 - Andropogon	1,0	40	44	44	-	-
2000 - S1=Bd, S2=Bd/Sg	-	-	-	-	-	-
2001 - S1=Bd, S2=Bd/Sg	-	40	30	40	-	-
2002 - S1=Bd, S2=Bd/Sg	-	-	30	60	-	-
2003 - S1=Bd, S2=Bd/Sg	-	-	-	-	-	-
2004 - S1=Bd, S2=Bd/Sg	-	-	-	-	-	-
2005 - S1=Bd, S2=Bd/Sg	-	-	-	-	-	-
2006 - S1=Bd, S2=Bd/Sg	1,1	-	-	-	-	-
2007- S1=Bd, S2=Bd/Stylo C. Grande	-	-	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>7,9</b>	<b>80</b>	<b>254</b>	<b>204</b>	<b>89,8</b>	<b>0</b>

<sup>1/</sup> Micronutrientes aplicados na forma de F.T.E. BR-12 ( 9% de Zn; 1,80% de B; 0,80% de Cu; 3,00% de Fe; 2,00% de Mn; e 0,10 % de Mo).

\* Micronutrientes aplicados na forma de F.T.E. BR-10 ( 7% de Zn; 2,50% de B; 1,00% de Cu; 4,00% de Fe; 4,00% de Mn; 0,10 de Mo; e 0,10% de Co).

<sup>2/</sup> Teor de água no gesso era de 22,6%.

<sup>3/</sup> A partir de 1994 as adubações foram realizadas em coberturas. Em novembro de 1999 as pastagens contínuas foram renovadas pela substituição do capim andropogon pela B. decumbens.

Na rotação lavoura pasto, o capim andropogon foi substituído pelo P. maximum cv. Tanzânia.

<sup>4/</sup> A pastagem foi plantada no residual da adubação dos cultivos anteriores.

\*\* Zinco aplicado através da fórmula 05-25-15-0,4 (NPKZn) e \*\* através da fórmula 20-20-0,3 (PKZn)

<sup>5/</sup> Em 2003 e 2004 usou a fórmula 0-20-20+micro

<sup>6/</sup> O plantio de sorgo foi realizado em 23 a 25 de janeiro de 2006.

<sup>7/</sup> No T2 O Marandu foi plantado com a soja e no T1 a soja foi plantada solteira e o Marandu foi plantado em 2004 e replantado em 2005

**Tabela 2** – Atributos microbiológicos utilizados no banco de dados do SIMOQS para calcular o índice de qualidade de solo das áreas de rotação soja/milho sob PD e PC, no período de agosto de 1998 até fevereiro de 2006.

	Ago/98	Jan/99	Ago/99	Jan/00	Ago/00	Jan/01	Ago/01	Jan/02	Jan/05	Fev/06
	<b>Plantio Direto</b>									
CBM <sup>1</sup>	130	303	279	502	321	455	185	326	146	75
Fosfat. Ácida <sup>2</sup>	566	802	641	682	634	920	979	1165	891	686
Arilsulfatase <sup>2</sup>	-	60	50	94	61	97	115	152	74	65
β-glicosidase <sup>2</sup>	165	162	124	202	105	242	319	325	190	116
CBM	161	175	166	429	425	169	197	82	212	48
	<b>Plantio Convencional</b>									
Fosfat. Ácida	301	489	472	427	356	480	372	514	575	450
Arilsulfatase	-	29	30	36	32	48	40	42	63	39
β-glicosidase	82	70	81	85	95	70	57	94	100	70
	<b>Cerrado</b>									
CBM	702	596	659	787	-	675	518	613	457	360
Fosfat. Ácida	834	1165	918	824	956	1100	1304	1452	1904	1003
Arilsulfatase	-	32	38	44	41	51	51	76	64	61
β-glicosidase	83	77	48	70	65	78	52	114	71	79

<sup>1</sup>CBM= carbono da biomassa microbiana do solo, mg C kg<sup>-1</sup> de solo;

<sup>2</sup> Atividade enzimática do solo expressa em= µg *p*-nitrofenol g<sup>-1</sup> de solo h<sup>-1</sup>,

**Tabela 3** – Atributos microbiológicos utilizados no banco de dados do SIMOQS para calcular o índice de qualidade de solo na área II, sistemas integrados lavoura / pastagem, no período de agosto de 1998 até abril de 2006.

	Ago/98	Jan/99	Jan/00	Març/ 04	Abril/ 06
	<b>Pastagem contínua de gramínea pura</b>				
CBM	313	319	233	380	417
Fosfatase ácida	290	842	467	550	862
Arilsulfatase	-	39	65	29	77
$\beta$ -glicosidase	37	70	60	61	140
	<b>Lavoura/Pastagem</b>				
CBM	260	286	227	403	381
Fosfatase ácida	275	588	359	514	779
Arilsulfatase	-	27	59	37	136
$\beta$ -glicosidase	35	48	92	107	153
	<b>Lavoura contínua</b>				
CBM	220	222	240	403	331
Fosfatase ácida	219	516	296	511	622
Arilsulfatase	-	21	63	34	73
$\beta$ -glicosidase	35	48	108	96	130
	<b>Pastagem consorciada/Lavoura</b>				
CBM	273	274	149	339	259
Fosfatase ácida	304	704	450	707	792
Arilsulfatase	-	35	89	30	101
$\beta$ -glicosidase	67	83	68	70	120
	<b>Pastagem consorciada contínua</b>				
CBM	332	344	283	410	449
Fosfatase ácida	368	833	557	625	1098
Arilsulfatase	-	39	88	33	131
$\beta$ -glicosidase	62	93	87	53	145
	<b>Cerrado</b>				

Continuação da Tabela 3						
CBM	424	450	483	580	404	
Fosfatase ácida	624	1118	881	554	1158	
Arilsulfatase	-	36	80	31	82	
$\beta$ -glicosidase	37	60	67	11	63	

<sup>1</sup>CBM= carbono da biomassa microbiana do solo, mg C kg<sup>-1</sup> de solo;

<sup>2</sup> Atividade enzimática do solo expressa em=  $\mu\text{g } p\text{-nitrofenol g}^{-1}$  de solo h<sup>-1</sup>,

**Tabela 4** – Atributos químicos dos solos das áreas I (rotação soja/milho sob PD e PC) e II (sistemas integrados lavoura/pecuária), na profundidade de 0 a 10cm, referentes ao ano de 2006 e utilizados no banco de dados do SIMOQS para calcular os índice de qualidade de solo.

	Matéria Orgânica	pH H <sub>2</sub> O	M(%)	P	K	Ca	Mg	CTC	S	V
	%		%	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	cmolc/dm <sup>3</sup>	cmolc/dm <sup>3</sup>	cmolc/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	%
				<b>Área I</b>						
PD	3,25	5,54	0	13,0	50,0	3,44	1,06	10,4	14,1	44a
PC	2,99	5,48	0	4,5	34,7	2,38	0,89	8,3	10,9	41b
Cerrado	3,38	4,75	43	0,4	46,7	0,34	0,47	9,0	11,5	10c
				<b>Área II</b>						
Past. Cont. Gram.	3,41	5,90	0	0,9	68	2,82	0,89	8,6	9,6	45
Lavoura/Pastagem	3,37	6,06	0	5,9	99	3,97	1,17	9,2	9,6	59
Lavoura Cont.	3,13	6,01	0	6,5	115	4,38	1,01	9,9	13,4	57
Past. Consorc./Lavoura	3,12	5,50	0	6,6	65	2,62	0,77	9,2	19,2	39
Past. Consorc. Cont.	3,78	5,81	0	0,6	64	3,11	0,90	9,5	9,6	44
Reserva	3,48	4,66	54	0,5	48	0,19	0,37	9,0	9,6	8

<sup>1</sup>M (%) saturação por alumínio=  $\text{Al}^{3+} / (\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K} + \text{Al}^{3+}) \times 100$ ; CTC=  $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K} + \text{H} + \text{Al}$ ; e V(%)= saturação por bases=  $(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}) / \text{CTC} \times 100$ ; S= enxofre;

<sup>2</sup> Os tratamentos de rotação lavoura pecuária em negrito indicam o sistema presente na área no momento da amostragem.

**Tabela 5** – Atributos físicos dos solos das áreas I (rotação soja/milho sob PD e PC) e II (sistemas integrados lavoura/pecuária), na profundidade de 0 a 10cm, referentes ao ano de 2006 e utilizados no banco de dados do SIMOQS para calcular os índices de qualidade de solo (IQS).

	Densidade g/cm <sup>3</sup>	Microporos %	Macroporos %	Porosidade %
Área I				
PD	0,93 a <sup>1</sup>	36,3	27,8	64,2
PC	0,90 ab	39,8	25,8	65,7
Cerrado	0,83 b	37,2	26,3	63,5
Área II				
Pastagem cont. Gram.	1,06	29,2	28,2	57,5
Lavoura/ <b>Pastagem</b> <sup>2</sup>	0,95	32,5	28,7	61,2
Lavoura contínua	1,03	30,7	29,2	60,0
Past. Consor./ <b>Lavoura</b>	0,93	31,2	34,2	65,5
Past. Consor. Cont.	0,95	31,7	33,0	64,7
Reserva	0,85	25,7	42,0	67,7

**Tabela 6** - Pesos numéricos associados aos indicadores e às funções do solo para determinação do índice de qualidade do solo (IQS) referentes ao ano de 2006.

Funções	Peso	Indicadores	Peso	Indicadores	Peso						
	%	Nível 1	%	Nível 2	%						
Receber, armazenar e suprir água	25	Matéria Orgânica	80								
Promover o crescimento das raízes	25	Densidade do solo	20	Al <sup>+3</sup>	33,33						
		Acidez/Toxidez de Al	25			pH	33,33				
		Nutrientes Minerais	37,50			H+Al	33,33				
						S-SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	38,89				
						P	11,11				
						Ca	50				
		Armazenar, suprir e ciclar nutrientes	25	Matéria Orgânica	25	CBM	100				
				Densidade do solo	12,50						
				Nutrientes na BM	20	Arilsulfatase	33,33				
				Atividade da BM	20			β-glucosidase	33,33		
Fosfatase ácida	33,33										
Nutrientes Minerais	40					S-SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	12,50				
						K <sup>+</sup>	12,50				
						Mg <sup>+2</sup>	12,50				
						P	37,50				
Promover a atividade biológica	25			Matéria Orgânica	20	Ca	25				
		Nutrientes Minerais	20,83					S-SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	15,38		
				Atividade da BM	25						
										K <sup>+</sup>	15,38
										Mg <sup>+2</sup>	7,69
		Atividade da BM	25			P	30,77				
						Ca	30,77				
						Arilsulfatase	26,67				
						β-glucosidase	40				
						Fosfatase ácida	33,33				
Matéria Orgânica	18,75										
pH em H <sub>2</sub> O	10,42										
CBM	25										

**Tabela 7** - Pesos numéricos associados aos indicadores e às funções do solo para determinação do índice de qualidade biológica do solo (IQBS).

Funções	Peso	Indicadores	Peso	Indicadores	Peso
	%	Nível 1	%	Nível 2	%
Armazenar, suprir e ciclar nutrientes	50	Nutrientes na BM	50	CBM	100
		Atividade da BM	50	Arilsulfatase	33,33
				$\beta$ -glucosidase	33,33
				Fosfatase ácida	33,33
Promover a atividade biológica	50	Atividade da BM	50	Arilsulfatase	26,67
				$\beta$ -glucosidase	40
				Fosfatase ácida	33,33
		CBM	50		

**Tabela 8** – Estrutura do modelo para determinação do IQS (índice de qualidade do solo).

<b>Funções</b>	<b>Escore</b>	<b>Peso</b>	<b>Produto</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Escore</b>	<b>Peso</b>	<b>Produto</b>
Função 1	$EF_1$	$PF_1$	$EF_1.PF_1$	Indicador <sub>1,1</sub>	$EI_{1,1}$	$PI_{1,1}$	$EI_{1,1}.PI_{1,1}$
				Indicador <sub>1,2</sub>	$EI_{1,2}$	$PI_{1,2}$	$EI_{1,2}.PI_{1,2}$
				:	:	:	:
				Indicador <sub>1,n</sub>	$EI_{1,n}$	$PI_{1,n}$	$EI_{1,n}.PI_{1,n}$
							$\Sigma = EF_1$
Função 2	$EF_2$	$PF_2$	$EF_2.PF_2$	Indicador <sub>2,1</sub>	$EI_{2,1}$	$PI_{2,1}$	$EI_{2,1}.PI_{2,1}$
				Indicador <sub>2,2</sub>	$EI_{2,2}$	$PI_{2,2}$	$EI_{2,2}.PI_{2,2}$
				:	:	:	:
				Indicador <sub>2,n</sub>	$EI_{2,n}$	$PI_{2,n}$	$EI_{2,n}.PI_{2,n}$
							$\Sigma = EF_2$
:							
:							
Função i	$EF_i$	$PF_i$	$EF_i.PF_i$	Indicador <sub>i,1</sub>	$EI_{i,1}$	$PI_{i,1}$	$EI_{i,1}.PI_{i,1}$
				Indicador <sub>i,2</sub>	$EI_{i,2}$	$PI_{i,2}$	$EI_{i,2}.PI_{i,2}$
				:	:	:	:
				Indicador <sub>i,n</sub>	$EI_{i,n}$	$PI_{i,n}$	$EI_{i,n}.PI_{i,n}$
							$\Sigma = EF_i$
$\Sigma = \text{IQS}$							

PF – peso da função do solo ( $\Sigma=1$ ); EF – escore da função do solo (somatório dos valores calculados para cada indicador associados a determinada função); PI – peso do indicador de qualidade ( $0 \leq EI's \leq 1$ ); IQS – índice de qualidade do solo.

**Tabela 9** – Parâmetros das funções de pontuação dos indicadores de qualidade de solo para o modelo Cerrado *Sentido Restrito*.

Indicador	Tipo de Curva	Unidade	Limite		Limite Superior	Linha Base		Ótimo	Referência
			Inferior	Superior		Inferior	Superior		
<b>Propriedades Físicas</b>									
<b>Densidade do solo</b>	(-) é melhor	g/cm <sup>3</sup>	0,8	1,2		1,0			
MO	(+) é melhor	%	2,4	4,5		3,35			Sousa & Lobato, 2004
pH	Ótimo	mg/dm <sup>3</sup>	4,0	5,3		4,45	5,1	4,9	Sousa & Lobato, 2004
Al	(-) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	0,2	1,5		0,85			Sousa & Lobato, 2004
P	(+) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	0,5	3,0		1,75			Sousa & Lobato, 2004
K	(+) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	0,06	0,15		0,105			Sousa & Lobato, 2004
Ca	(+) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	0,1	3,5		1,8			Sousa & Lobato, 2004
Mg	(+) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	0,1	0,5		0,3			Sousa & Lobato, 2004
S	(+) é melhor	mg/dm <sup>3</sup>	4	10		7			Sousa & Lobato, 2004
H+Al	(-) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	6,0	11		8,5			Sousa & Lobato, 2004
<b>Propriedades Biológicas</b> <sup>3</sup>									
CBM <sup>1</sup>	(+) é melhor		147	1174		660			MI e MS
β-glicosidase <sup>2</sup>	(+) é melhor		5	171		88			MI e MS
Ariilsulfatase <sup>2</sup>	(+) é melhor		15	153		84			MI e MS
Fosfatase ácida <sup>2</sup>	(+) é melhor		277	2856		1566			MI e MS

<sup>1</sup> CBM= carbono da biomassa= mg C kg<sup>-1</sup> solo ;

<sup>2</sup> valores expressos em µg p-nitrofenol g<sup>-1</sup> solo h<sup>-1</sup>

<sup>3</sup> Limite superior = MS × 1,5 e limite inferior = MI × 0,5 onde MS e MI são as maiores médias superiores e inferiores nas duas áreas de cerrado.

**Tabela 10** – Parâmetros das funções de pontuação dos indicadores de qualidade de solo para o modelo Culturas Anuais e Pastagens muito exigentes, solo argiloso.

Indicador	Tipo de Curva	Unidade	Limite		Linha Base Inferior	Linha Base Superior	Ótimo	Referência
			Inferior	Superior				
<b>Densidade do solo</b>	(-) é melhor	g/cm <sup>3</sup>	0,8	1,2	1,0			
MO	(+) é melhor	%	2,4	4,5	3,45		Sousa & Lobato, 2004	
pH	Ótimo	mg/dm <sup>3</sup>	5,2	6,3	5,75	6,15	6	Sousa & Lobato, 2004
Al	(-) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	0	0	0		Sousa & Lobato, 2004	
P	(+) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	3,1	12	7,55		Sousa & Lobato, 2004	
K	(+) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	0,06	0,20	0,13		Sousa & Lobato, 2004	
Ca	(+) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	1,5	5,0	3,25		Sousa & Lobato, 2004	
Mg	(+) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	0,5	1,5	1		Sousa & Lobato, 2004	
S	(+) é melhor	mg/dm <sup>3</sup>	5	10	7,5		Sousa & Lobato, 2004	
H+Al	(-) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	2,0	5,0	3,5		Sousa & Lobato, 2004	
<b>CBM<sup>1</sup></b>	(+) é melhor		35	996	515		MI e MS	
<b>β-glicosidase<sup>2</sup></b>	(+) é melhor		17	487	251		MI e MS	
<b>Arlsulfatase<sup>2</sup></b>	(+) é melhor		10	228	119		MI e MS	
<b>Fosfatase ácida<sup>2</sup></b>	(+) é melhor		109	1948	1028		MI e MS	
<b>Propriedades Físicas</b>								
<b>Propriedades Químicas</b>								
<b>Propriedades Biológicas<sup>3</sup></b>								

<sup>1</sup> CBM= carbono da biomassa= mg C kg<sup>-1</sup> solo ;

<sup>2</sup> valores expressos em µg p-nitrofenol g<sup>-1</sup> solo h<sup>-1</sup>

<sup>3</sup> Limite superior = MS × 1,5 e limite inferior= MI × 0,5 onde MS e MI são as maiores médias superiores e inferiores observadas nos tratamentos com culturas anuais e com pastagens consorciadas.

**Tabela 11** – Parâmetros das funções de pontuação dos indicadores de qualidade de solo para o modelo Pastagens pouco exigentes, solo argiloso.

Indicador	Tipo de Curva	Unidade	Limite		Limite Superior	Linha Base		Ótimo	Referência
			Inferior	Superior		Inferior	Superior		
Densidade Global	(-) é melhor	g/cm <sup>3</sup>	0,8	1,2		1,0			
MO	(+) é melhor	%	2,4	4,5		3,45		Sousa & Lobato, 2004	
pH	Ótimo	mg/dm <sup>3</sup>	5,2	5,5		5,25	6,15	6	Sousa & Lobato, 2004
Al	(-) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	0	0		0			Sousa & Lobato, 2004
P	(+) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	1,1	4		2,55			Sousa & Lobato, 2004
K	(+) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	0,07	0,13		0,1			Sousa & Lobato, 2004
Ca	(+) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	0,5	1,5		1			Sousa & Lobato, 2004
Mg	(+) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	0,2	0,5		0,35			Sousa & Lobato, 2004
S	(+) é melhor	mg/dm <sup>3</sup>	2,5	10		6,25			Sousa & Lobato, 2004
H+Al	(-) é melhor	cmolc/dm <sup>3</sup>	1,5	6,5		5,5			Sousa & Lobato, 2004
<b>Propriedades Físicas</b>									
<b>Propriedades Químicas</b>									
<b>Propriedades Biológicas</b> <sup>3</sup>									
CBM <sup>1</sup>	(+) é melhor		35	996		515			MI e MS
β-glicosidase <sup>2</sup>	(+) é melhor		17	487		251			MI e MS
Ariulfatase <sup>2</sup>	(+) é melhor		10	228		119			MI e MS
Fosfatase ácida <sup>2</sup>	(+) é melhor		109	1948		1028			MI e MS

<sup>1</sup> CBM= carbono da biomassa= mg C kg<sup>-1</sup> solo ;

<sup>2</sup> valores expressos em µg p-nitrofenol g<sup>-1</sup> solo h<sup>-1</sup>

<sup>3</sup> Limite superior = MS × 1,5 e limite inferior= MI × 0,5 onde MS e MI são as maiores médias superiores e inferiores observadas na pastagem contínua de gramínea.

**Tabela 12** – Índices de qualidade biológica do solo (IQBS) e de qualidade de solo (IQS) da área I, rotação soja/milho sob plantio direto e plantio convencional, calculados utilizando o SIMOQS.

Tratamento	----- IQBS -----										IQS	
	Jan/98	Jan/99	Ago/99	Jan/00	Jan/00	Ago/00	Jan/01	Jan/01	Ago/01	Jan/02		Abr/05
PD	5,2	11	6,3	33,4	8,2	35,2	29,9	44,8	13	33,3		
PC	1,2	1,7	1,6	15,1	14,5	1,9	1,7	1,5	3,9	20,2		
Cerrado	42,4	26,2	27,5	45	7,9	36,5	16,7	46,4	26,2	41,4		

**Tabela 13** – Índices de qualidade do solo (IQS) e de qualidade biológica de solo (IQBS) da área II, sistemas integrados lavoura e pecuária, calculados utilizando o SIMOQS.

Tratamentos	----- IQBS -----							IQS
	Ago/98	Jan/99	Jan/00	Març/04	Abr/06			
Past. Cont. Gramínea	5,1	9,8	3,5	10,5	43,9			
Past. Cont. Consorc.	6,4	11,4	7,6	13,9	58,9			
Lav/Past. Consorc.	2,8	4,9	3,1	12,9	42,9			
Past. Consorc./Lav	3,5	5,8	4,0	8,9	26,2			
Lavoura Continua	1,7	2,5	3,7	12,8	28,2			
Cerrado	5,2	10,3	18,3	15,7	49,2			

