



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**QUALIDADE DO SOLO EM MATA NATIVA E EM AGROECOSSISTEMAS DA
MICROBACIA DO CÓRREGO LAMARÃO - DF**

LEANDRO GUIMARÃES CRUVINEL E PALOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA/DF
MARÇO/2019



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

QUALIDADE DO SOLO EM MATA NATIVA E EM AGROECOSSISTEMAS DA
MICROBACIA DO CÓRREGO LAMARÃO - DF

LEANDRO GUIMARÃES CRUVINEL E PALOS

ORIENTADORA: ANA MARIA RESENDE JUNQUEIRA
CO-ORIENTADOR: TAIRONE PAIVA LEÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

PUBLICAÇÃO:

BRASÍLIA/DF
MARÇO/2019



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**QUALIDADE DO SOLO EM MATA NATIVA E EM AGROECOSSISTEMAS DA
MICROBACIA DO CÓRREGO LAMARÃO - DF**

LEANDRO GUIMARÃES CRUVINEL E PALOS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM AGRONOMIA.**

APROVADA POR:

ANA MARIA RESENDE JUNQUEIRA, Ph.D., Professora Associada
(Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – Universidade de Brasília – UnB)
(ORIENTADORA) e-mail: anamaria@unb.br

CÍCERO CÉLIO DE FIGUEIREDO, Doutor, Professor Associado
(Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – Universidade de Brasília – UnB)
(EXAMINADOR INTERNO) e-mail: cicero@unb.br

FRANCISCO VILELA RESENDE, Doutor, Pesquisador (Embrapa Hortaliças)
(EXAMINADOR EXTERNO) e-mail: francisco.resende@embrapa.br

BRASÍLIA/DF, 12 de março de 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Palos, Leandro Guimarães Cruvinel e

Qualidade do solo em mata nativa e em agroecossistemas da microbacia do Córrego Lamarão – DF / Leandro Guimarães Cruvinel e Palos; Orientadora: Ana Maria Resende Junqueira - Brasília, 2019.

77 f.; il.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2019.

1. Índice de qualidade do solo. 2. Parâmetros dos solo. 3. Pagamentos por serviços ambientais.

I. JUNQUEIRA, A.M.R. II. Ph.D.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PALOS, L. G. C. **Qualidade do solo em mata nativa e em agroecossistemas da microbacia do Córrego Lamarão – DF**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2019, 74 p. Dissertação de Mestrado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Leandro Guimarães Cruvinel e Palos

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: **Qualidade do solo em mata nativa e em agroecossistemas da microbacia do Córrego Lamarão – DF**

GRAU: Mestre

ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada a fonte.

Nome: Leandro Guimarães Cruvinel e Palos
Tel: (61) 996104041 / Email: lgcpalos@gmail.com

*Dedico esse trabalho primeiramente a Deus.
Aos meus pais, Carmelita e Valdemar; as
minhas filhas Carolina e Gabriela e à minha esposa
Sonali.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por guiar meus passos, me dando saúde e coragem para enfrentar qualquer dificuldade.

Aos meus pais, Carmelita e Valdemar, pela minha vida e criação, sem os quais não teria a perseverança necessária.

As minhas filhas Carolina e Gabriela, razões maiores da minha vida.

A minha esposa Sonali, pela força e compreensão nos momentos difíceis.

À minha orientadora Professora Ana Maria Resende Junqueira, pelos ensinamentos, pela abertura para realização dessa pesquisa, pelos contatos com a EMATER-DF, pelos conselhos e várias reuniões de direcionamento.

Ao meu co-orientador Professor Tairone Paiva Leão, pela disponibilidade, pelos ensinamentos e pelas atividades realizadas no Laboratório de Física do Solo.

À Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, por disponibilizar as instalações dos Laboratórios de Física e de Fertilidade dos solos, permitindo a realização das análises desse trabalho.

Ao Professor Cícero Célio de Figueiredo, pelas sugestões e atenção na construção e análise dessa dissertação de mestrado.

Ao Dr Francisco Vilela Resende, pela valiosa contribuição a esse manuscrito.

À Direção do Ministério do Meio Ambiente, que me concedeu o tempo necessário para realização deste Curso de Mestrado em Agronomia.

Ao estudante de Agronomia e estagiário do Centro Vocacional Tecnológico em Agroecologia e Agricultura Orgânica da Universidade de Brasília (CVTUnB), Nelson Vilanova, pelo valioso auxílio na coleta das amostras de solo em campo.

Ao colega de mestrado Felipe Cardoso, pela ajuda com confecção dos mapas.

Aos técnicos dos laboratórios de física e de matéria orgânica do solo, Alexandre Souza e Priscila Reis, pelo auxílio e compreensão.

Ao Engenheiro Agrônomo da Emater Marconi Borges, pelo auxílio na escolha das áreas de pesquisa e contato com os produtores rurais.

Aos produtores rurais, por permitirem que esta pesquisa fosse desenvolvida em suas propriedades.

A tantos colegas de curso que auxiliaram em minhas dificuldades e limitações.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. HIPÓTESES	3
3. OBJETIVOS	3
3.1. Objetivo Geral	3
3.2. Objetivos Específicos	3
4. REVISÃO DE LITERATURA	4
4.1. Desenvolvimento sustentável	4
4.2. Serviços ecossistêmicos da agricultura.....	6
4.3. Indicadores ambientais na agricultura	8
4.3.1. Indicadores de qualidade do solo.....	9
5. MATERIAIS E MÉTODOS	17
5.1. Caracterização da microbacia hidrográfica	17
5.2. Seleção dos indicadores de solo	19
5.3. Seleção das propriedades rurais avaliadas.....	20
5.4. Levantamento de dados	21
5.4.1. Entrevista com produtores	21
5.4.2. Coleta das amostras de solo	22
5.4.3. Análises físicas, químicas, biológicas e classificação dos solos.....	23
5.5. Análises estatísticas	24
5.6. Cálculo e comparação dos escores dos indicadores de qualidade dos solos	25
5.7. Cálculo dos índices de qualidade dos solos.....	30
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
6.1. Classificação dos solos	32
6.2. Propriedades químicas, físicas e biológicas dos solos.....	33
6.3. Cálculo dos escores	36
6.3.1 Escores Método Tabelas Padronizadas.....	37
6.3.2 Escores Método Matemático	40
6.4. Comparação dos escores entre os Métodos de Tabelas Padronizadas e Matemático.....	42
6.4.1 Indicadores biológicos	42
6.4.2 Indicadores físicos	44
6.4.3 Indicadores químicos	45
6.5. Índice de Qualidade do Solo.....	47
6.5.1 IQS – Método de Tabelas Padronizadas	47

6.5.2 IQS – Método Matemático por Grupos	49
6.5.3 IQS – Método Misto	50
6.6. Avaliação e perspectivas	52
7. CONCLUSÕES	53
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Relação entre função do solo e respectivo serviço ecossistêmico	07
Tabela 2. Parâmetros físicos, químicos e biológicos avaliados nos solos das áreas	19
Tabela 3. Parâmetros das funções de pontuação dos indicadores de qualidade de solo – Método Tabelas Padronizadas	27
Tabela 4. Parâmetros das funções de pontuação dos indicadores de qualidade de solo do Grupo 1 – Método matemático (+- 15%)	28
Tabela 5. Parâmetros das funções de pontuação dos indicadores de qualidade de solo do Grupo 2 – Método matemático (+- 15%)	29
Tabela 6. Estrutura do modelo para determinação do índice de qualidade do solo (IQS)	30
Tabela 7. Parâmetros e respectivos pesos utilizados para cálculo dos Índices de Qualidade do Solo (IQS) de acordo com a função do solo	31
Tabela 8. Parâmetros para classificação dos solos das áreas estudadas	32
Tabela 9. Características físicas dos solos estudados	33
Tabela 10. Teste de Dunn para os resultados de análises físicas dos solos estudados	34
Tabela 11. Carbono da biomassa e atividade enzimática dos solos estudados.....	35
Tabela 12. Teste de Dunn para os resultados de carbono da biomassa microbiana dos solos estudados	35
Tabela 13. Análises químicas dos solos estudados.....	36
Tabela 14. Escores dos indicadores biológicos - Método Tabelas Padronizadas.....	38
Tabela 15. Escores dos indicadores físicos - Método Tabelas Padronizadas.....	39
Tabela 16. Escores dos indicadores químicos - Método Tabelas Padronizadas.....	39
Tabela 17. Escores dos indicadores biológicos - Método matemático.....	40
Tabela 18. Escores dos indicadores físicos – Método matemático	41
Tabela 19. Escores dos indicadores químicos – Método matemático	42
Tabela 20. Índices de qualidade dos solos (IQS) por função e geral – Método Tabelas Padronizadas	47
Tabela 21. Índices de qualidade dos solos (IQS) – Método Matemático por Grupos	49
Tabela 22. Índices de qualidade dos solos (IQS) – Método Misto.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de curvas de pontuação padronizada utilizadas na normalização dos indicadores, sendo: L - limite inferior; B - linha base; S - valor da tangente em B	15
Figura 2. Mapa hidrográfico da Sub Bacia do Rio Jardim e Microbacia do Córrego Lamarão com localização das áreas estudadas.....	17
Figura 3. Mapa de solos da Sub Bacia do Rio Jardim e Microbacia do Córrego Lamarão com localização das áreas estudadas	18
Figura 4. Propriedades selecionadas para coleta e análises de solo: A – grande propriedade orgânica; B – grande propriedade de produção de grãos; C – pequena propriedade de horticultura convencional.....	20
Figura 5. Áreas selecionadas para coleta e análises de solo: A1 – grãos pivô central (milho); A2 – grãos sequeiro (soja); A3 – mata adjacente à área de produção de grãos; A4 – hortaliça orgânica; A5 – hortaliça convencional; A6 – mata adjacente às áreas de produção de hortaliça	21
Figura 6. Mapa de solos com detalhamento da identificação das áreas estudadas.....	32
Figura 7. Comparação entre os indicadores biológicos do solo em relação à linha de base pelo método de tabelas de parâmetros (A) e método matemático (B)	43
Figura 8. Comparação entre os indicadores físicos do solo em relação à linha de base pelo método de tabelas de parâmetros (A) e método matemático (B)..	44
Figura 9. Comparação entre os indicadores químicos do solo em relação à linha de base pelo método de tabelas de parâmetros (A) e método matemático (B).	46
Figura 10. Índices de qualidade do solo obtidos pelo método de tabelas de parâmetros, média geral e de acordo com cada função do solo: receber, armazenar e suprir água (Função 1); promover o crescimento das raízes (Função 2); armazenar, suprir e ciclar nutrientes (Função 3) e promover a atividade biológica (Função 4)	48
Figura 11. Índices de qualidade do solo obtidos pelo método matemático, média geral e de acordo com cada função do solo: receber, armazenar e suprir água (Função 1); promover o crescimento das raízes (Função 2); armazenar, suprir e ciclar nutrientes (Função 3) e promover a atividade biológica (Função 4).....	50
Figura 12. Índices de qualidade do solo obtidos pelo método misto, média geral e de acordo com cada função do solo: receber, armazenar e suprir água (Função 1); promover o crescimento das raízes (Função 2); armazenar, suprir e ciclar nutrientes (Função 3) e promover a atividade biológica (Função 4).....	51

QUALIDADE DO SOLO EM MATA NATIVA E EM AGROECOSSISTEMAS DA MICROBACIA DO CÓRREGO LAMARÃO – DF

RESUMO

No Brasil, o Pagamento por Serviços Ambientais tem sido restrito à preservação da vegetação nativa e redução de erosão, não sendo considerados outros aspectos da propriedade rural, como, por exemplo, o sistema de manejo das culturas. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial do uso de indicadores agroambientais de qualidade do solo como ferramenta de auxílio no monitoramento e mitigação das variações causadas pelo manejo das culturas nas áreas estudadas. A pesquisa se desenvolveu em três propriedades rurais localizadas no Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal (PAD-DF), em seis áreas de Latossolo Vermelho divididas em dois grupos: horticultura orgânica, horticultura convencional e respectiva vegetação nativa adjacente, grupo 1, e cultivo de grãos em plantio direto, com soja de sequeiro e milho irrigado com pivô central, com respectiva vegetação nativa, grupo 2, onde foram avaliados indicadores físicos, químicos e biológicos. Foram comparadas três metodologias de construção de índice de qualidade de solos com a contribuição dos indicadores observados. No método matemático, os escores tendem aos extremos, aumentando a variação entre os escores e conseqüentemente entre os índices de Qualidade do Solo (IQS), que obteve variações máximas na função “receber, armazenar e suprir água”, sendo 564% entre as áreas de cultivo de soja sequeiro e respectiva vegetação nativa, grupo 1, e de 2.114% entre a área de horticultura orgânica e vegetação nativa adjacente, grupo 2. O método misto, com 95% e 109%, e o método de tabelas padronizadas, com 49,5% e 38%, apresentaram variações menores entre os maiores e menores IQS na função “armazenar, suprir e ciclar nutrientes” nos grupos 1 e 2, respectivamente. O método de tabelas de parâmetros foi mais preciso que o método misto e este mais preciso que o matemático para a determinação da qualidade dos solos, possibilitando comparar a variação de indicadores com as condições de manejo. A agregação dos escores dos indicadores, obtidos pelo método de tabelas de padronização, em um único valor de IQS, possibilitou uma diferenciação da qualidade dos solos analisados sob os diferentes manejos. No entanto, uma avaliação dos escores, individualmente, pode identificar os problemas de manejo que contribuem para redução da qualidade dos solos, como, por exemplo, o baixo escore para carbono da biomassa microbiana em áreas de horticultura, conseqüência do revolvimento no preparo para o plantio e a falta de cobertura morta do solo. Foi possível identificar também deficiência na produção de palhada nas áreas de plantio direto, considerando a baixa atividade da enzima beta-glicosidase nestas áreas. As áreas de vegetação nativa, com maiores teores de matéria orgânica, apresentaram os maiores IQS, enquanto as áreas de soja em cultivo de sequeiro, grupo 1, e horticultura orgânica, grupo 2, foram as que obtiveram menores IQS e teores de matéria orgânica, uma vez que este indicador possui o maior peso, contribuindo com 37,5% no escore final.

Palavras-chave: Índice de Qualidade do solo, parâmetros do solo, pagamento por serviços ambientais.

SOIL QUALITY IN NATIVE VEGETATION AND AGROECOSYSTEMS IN THE MICROBACY OF LAMARÃO STREAM - DF

ABSTRACT

In Brazil, the Payment for Environmental Services has been restricted to the preservation of native vegetation and erosion reduction, not considering other aspects of rural property, such as the crop management system. The present work had the objective of evaluating the potential of the use of agro - environmental indicators of soil quality as a tool to aid in the monitoring and mitigation of variations caused by crop management in the studied areas. The research was carried out in three rural properties located in the Directed Settlement Program of the Federal District (PAD-DF), in six areas of Red Latosol divided in two groups: organic horticulture, conventional horticulture and respective native vegetation, group 1, and cultivation of no - till crops, with dry soya and irrigated corn with central pivot, with respective native vegetation, group 2, where physical, chemical and biological indicators were evaluated. Three methodologies of soil quality index construction were compared with the contribution of the observed indicators. In the mathematical method, the scores tended to extremes, increasing the variation between the scores and consequently between the Soil Quality Indexes (IQS), which obtained maximum variations in the "receive, store and supply water" function, with 564% between areas of dry soya bean crop and respective native vegetation, group 1, and of 2.114% between the organic horticulture area and adjacent native vegetation, group 2. The mixed method, with 95% and 109%, and the standardized tables method, with 49.5% and 38%, presented smaller variations between the major and minor IQS in the "store, supply and cycle nutrients" function in groups 1 and 2, respectively. The method of parameter tables was more accurate than the mixed method and this method was more precise than the mathematical one for the determination of the quality of the soils, making it possible to compare the variation of indicators with the management conditions. The aggregation of the scores of the indicators, obtained by the method of standardization tables, in a single value of IQS, allowed a differentiation of the quality of the analyzed soils under the different management. However, an assessment of the individual scores can identify management problems that contribute to soil quality reduction, such as the low carbon score of microbial biomass in horticultural areas, as a consequence of the planting and lack of mulch. It was also possible to identify deficiency in straw production in no-tillage areas, considering the low activity of the beta-glucosidase enzyme in these areas. The areas of native vegetation, with higher organic matter content, showed the highest IQS, while the areas of soybeans in dryland, group 1 and organic horticulture, group 2, were the ones that obtained lower IQS and organic matter contents, since this indicator has the greatest weight, contributing with 37.5% in the final score.

Keywords: Soil quality index, soil parameters, environmental services payment.

1. INTRODUÇÃO

O livro intitulado *Primavera Silenciosa*, de Rachel Carson, publicado em 1962, denunciou que o uso desenfreado de pesticidas nos Estados Unidos, particularmente o organoclorado DDT, estava causando o desaparecimento de espécies de aves tendo em vista o acúmulo progressivo de resíduos deste pesticida ao longo das cadeias alimentares (BONZI, 2013). Apesar deste alerta, o processo de modernização da agricultura, baseado na monocultura, mecanização e aplicação de insumos externos, como fertilizantes e agrotóxicos, foi disseminado a partir do final da década de 60 e início da década de 70 para todas as partes do globo (BORGES FILHO, 2004).

Porém, apesar de existirem tecnologias e sistemas de produção que promovam a conservação e sustentabilidade dos solos para produção, estes são pouco utilizados. A agricultura, quando bem manejada, pode prestar uma série de serviços ecossistêmicos, sendo que as funções do solo são responsáveis pela maioria deles, contribuindo para a diminuição do efeito estufa e do aquecimento global, bem como a manutenção da qualidade da água e a conservação da biodiversidade.

Ainda ocorre de forma generalizada a aplicação excessiva de agrotóxicos e a falta de práticas conservacionistas, o que tem gerado contaminação ambiental e degradação dos solos. Segundo Romeiro (2007), esse modo de produção, que tem como consequência a redução dos serviços ecossistêmicos, é cada vez mais dependente da aplicação de altas doses de fertilizantes e agrotóxicos.

A política ambiental para o desenvolvimento de uma agricultura mais sustentável pode ser realizada por instrumentos de comando e controle, com proibição e restrições de produtos, atividades e tecnologias lesivas ao meio ambiente; por meio de comunicação e educação ambiental e por meio de instrumentos econômicos, com recompensa e estímulo aos agentes que preservam a natureza e compensação de eventuais perdas financeiras pelo custo de oportunidade e custos de manutenção/recuperação de ativos ambientais. (Furlan, 2008; Lustosa, Cánepa & Young, 2010).

A avaliação do progresso das políticas públicas para a sustentabilidade da agricultura, como, por exemplo, o pagamento por serviços ambientais, necessita de critérios de mensuração e validação. No Brasil existem algumas experiências de avaliação dos impactos ambientais na agricultura. Porém, no quesito solo, centram-se na sua fertilidade ou práticas de conservação, não possibilitando uma identificação segura da possibilidade de degradação futura pelo manejo adotado no presente. Nesse sentido, é importante a avaliação de novos indicadores que, junto

com a fertilidade do solo, considerem características físicas e biológicas para monitoramento e valoração dos solos, objetivando a sustentabilidade da agricultura com manutenção do seu potencial produtivo. Os indicadores de solo, propostos nesta pesquisa, incluindo densidade e resistência à penetração, como parâmetros físicos, e carbono da biomassa microbiana e atividade enzimática, como parâmetros biológicos, podem auxiliar, em apoio aos indicadores de fertilidade do solo, na avaliação da qualidade dos solos e na valoração de serviços ecossistêmicos prestados pelos nossos agricultores rurais.

2. HIPÓTESES

As variações dos indicadores com o manejo das culturas podem ser identificadas pelo índice de qualidade do solo, unificando os parâmetros químicos, físicos e biológicos.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Avaliar o potencial do uso de indicadores agroambientais de qualidade do solo como ferramenta de auxílio no monitoramento e mitigação das variações causadas pelo manejo das culturas nas áreas estudadas.

3.2. Objetivos Específicos

i. Avaliar indicadores físicos, químicos e biológicos em áreas manejadas com horticultura orgânica, horticultura convencional, cultivo de grãos em plantio direto - soja de sequeiro e milho sob pivô central, e em áreas de vegetações nativas adjacentes.

ii. Comparar três metodologias de cálculo do índice a qualidade dos solos com a contribuição de indicadores observados nos diferentes sistemas de manejo e em áreas sob vegetação nativa.

iii. Comparar os diferentes ecossistemas estudados quanto ao índice de qualidade do solo de acordo com os indicadores analisados.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Desenvolvimento sustentável

Os limites do desenvolvimento do planeta começaram a ser discutidos desde a década de 60, a partir do questionamento da mortandade de aves pelo uso de pesticidas nos Estados Unidos, com manifestações contrárias aos métodos de desenvolvimento adotados na agricultura onde prevalecia uma postura essencialmente econômica, causando sérios danos sociais e ambientais, conforme observado por Lopes et al. (2017) e Bonzi (2013).

Em pesquisa encomendada pelo Clube de Roma, integrado por pessoas de diversos segmentos da sociedade, preocupadas com esses limites, foram analisados os seguintes pontos críticos para o desenvolvimento do planeta: o crescimento demográfico, a produção de alimentos, o ritmo do crescimento industrial, os níveis de poluição gerados pela atividade econômica e o consumo de recursos naturais não renováveis (BURSZTYN et al., 2012).

O resultado desses estudos, publicado em 1972, gerou o relatório “Os Limites do Crescimento”, mais conhecido como Relatório Meadows, indicando que se mantidos os níveis de industrialização, poluição, produção de alimentos e exploração dos recursos naturais, o limite de desenvolvimento do planeta seria atingido, no máximo, em 100 anos (MEADOWS et al., 2007). Também em 1972, tendo esse relatório como subsídio, realizou-se a 1ª Conferência Internacional para o Meio Ambiente Humano, que incluiu a variável ambiental nas relações políticas, econômicas e sociais, sendo criado o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA).

Em 1973, surge o conceito de ecodesenvolvimento, cujos caminhos do desenvolvimento seriam seis: satisfação das necessidades básicas, solidariedade com as gerações futuras, participação da população envolvida, preservação dos recursos naturais e do meio ambiente, elaboração de um sistema social que garanta emprego, segurança social e respeito a outras culturas e programas de educação. Os debates em torno do ecodesenvolvimento abriram espaço ao conceito de desenvolvimento sustentável (LAYRARGUES, 1997). O PNUMA encampa o conceito de ecodesenvolvimento destacando a necessidade de atender a realidade de crescimento de cada ecoregião e a utilização de forma adequada dos recursos naturais (GAVARD, 2009).

O relatório “O Nosso Futuro Comum”, resultado da Assembleia Geral das Nações Unidas, realizada em 1987, apresentou o conceito de desenvolvimento sustentável utilizável até os dias atuais, definido como aquele que “atende as necessidades do presente sem comprometer

a capacidade das gerações futuras atenderem as suas” (GAVARD, 2009). Nesse relatório constam os principais entraves ao desenvolvimento: o crescimento demográfico, o desflorestamento, a degradação do solo em razão da agricultura e da pecuária, a destruição das espécies e as alterações climáticas (LOPES et al., 2017).

A publicação do relatório “O Nosso Futuro Comum” influenciou a Assembleia Geral das Nações Unidas a realizar a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, que aconteceu em 1992 no Rio de Janeiro. Na ocasião foi reafirmada a declaração de Estocolmo (1972) e foram discutidos os principais desafios sociais e ambientais da humanidade à época, bem como o futuro das próximas gerações (PAGLIARIN e TOLENTINO, (2015). Importantes documentos foram elaborados na Conferência Rio-92, que direcionaram para um comportamento mais responsável de toda a sociedade: Agenda 21 - programa de ação global, Declaração do Rio (conjunto de 27 princípios pelos quais deve ser conduzida a interação dos humanos com o Planeta), Declaração de Princípios sobre Florestas, Convenção sobre Diversidade Biológica e Convenção-Quadro sobre Mudanças Climáticas - que originou o Protocolo de Quioto em 1997. Estes documentos abrangem tanto as questões ecológicas: proteção da atmosfera, proteção da água doce, dos mares e oceanos do planeta e conservação da biodiversidade, como também faz uma análise da relação entre a estrutura da economia mundial e a degradação ambiental, definindo estratégias para criar um ambiente mais favorável e um crescimento responsável, conforme relata Alves (2001).

O termo desenvolvimento sustentável em seus três principais pilares: econômico, social e ambiental foi consolidado na Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável, também conhecida como Rio+10, realizada em 2002 pela ONU em Johannesburgo, na África do Sul (PAGLIARIN e TOLENTINO, 2015). Porém, evidenciou a falta de interesse dos países ricos em assumir responsabilidade pelos danos ambientais causados, com o compromisso de redução dos impactos ao meio ambiente, principalmente, quanto à redução das emissões dos gases de efeito estufa (GUIMARÃES e FONTOURA, 2012).

A agricultura desempenha um papel fundamental na sustentabilidade do planeta e da vida humana, pelo provimento de alimentos, fibras e energia renovável. Porém, para que haja o equilíbrio, seus sistemas de manejo precisam conservar e melhorar o meio ambiente, prestando serviços ambientais além da provisão de produtos de consumo. De acordo com FAO (2015), o solo é importante não só como base da produção de alimentos, mas responsável também por uma série de relevantes serviços ecossistêmicos, como por exemplo, a filtragem e

armazenamento de água e o sequestro de carbono. Nada obstante sua importância para os serviços ecossistêmicos, boa parte do planeta possui ameaças severas a esse recurso natural.

4.2. Serviços ecossistêmicos da agricultura

A maioria dos autores trata como sinônimos serviços ecossistêmicos e serviços ambientais. De acordo com o Millennium Ecosystem Assessment (2005), bens e serviços ecossistêmicos ou serviços ambientais são os benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas. Os serviços ambientais que beneficiam a sociedade podem ser classificados em quatro categorias: serviços de suporte, que propiciam as condições necessárias para a disponibilização dos demais serviços, sendo seus benefícios de maneira indireta e no longo prazo; serviços de provisão, que são os produtos obtidos dos ecossistemas; serviços de regulação, que são os benefícios obtidos a partir da regulação natural dos processos ecossistêmicos e serviços culturais, que são os benefícios não materiais obtidos dos ecossistemas que contribuem para o bem-estar da sociedade.

O atual Código Florestal, Lei 12.651/2012 prevê o pagamento por serviços ambientais, de forma monetária ou não, dentre outras atividades, para a conservação e o melhoramento do solo. Tramita na Câmara dos Deputados o substitutivo ao Projeto de Lei nº 792, de 2007 e seus apensados, dentre os quais o Projeto de Lei 5.487/2009 que contém os seguintes elementos: Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA); Programa Federal de Pagamento por Serviços Ambientais (ProPSA); Cadastro Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; contratos de PSA. O Fundo Federal de Pagamento por Serviços Ambientais (FunPSA) foi retirado na proposta do substitutivo, considerando que o Fundo Nacional de Meio Ambiente cumpriria essa função. Conforme consta em Brasil (2015), a Política Nacional objetiva manter, recuperar ou melhorar os serviços ambientais em todo o território nacional, tendo como áreas prioritárias: conservação da biodiversidade; dos recursos hídricos, do solo, além de controlar a perda e a fragmentação de habitats, a desertificação e os demais processos de degradação dos ecossistemas.

Os serviços ecossistêmicos prestados pelo solo como a retenção de carbono e nitrogênio, contribuindo para a diminuição do efeito estufa e do aquecimento global, a manutenção da qualidade da água com a redução de sua contaminação pela redução da lixiviação e escoamento superficial de nitratos e compostos tóxicos, bem como a conservação da biodiversidade FAO (2015). De acordo com a Tabela 1, os serviços ecossistêmicos estão diretamente relacionados com suas funções, podendo ser classificados como suporte, provisão, regulação e cultural, conforme sintetizado por Prado et al. (2016).

Tabela 1. Relação entre função do solo e respectivo serviço ecossistêmico.

Função do solo	Tipo de Serviço	Serviço ecossistêmico
Suporte à vegetação terrestre	Suporte	Formação e renovação do solo
Processos de formação do solo	Suporte	Formação e renovação do solo
Armazenamento, ciclagem, processamento de nutrientes e disponibilização para as plantas	Suporte	Ciclagem de nutrientes
Estruturas de apoio à ocupação e atividades humanas (exemplo: habitação, indústria, infraestrutura)	Suporte	Base física
Habitat para populações residentes e transitórias (um componente para habitats terrestres)	Provisão	Refúgio
Retenção e abastecimento de água na paisagem	Provisão	Armazenamento de água
Provisão de crescimento e produção de plantas	Provisão	Fornecimento de alimentos, fibras, combustíveis e madeira (biomateriais)
Fonte de materiais de origem	Provisão	Fornecimento de matérias-primas de origem mineral
Fonte de materiais e produtos biológicos únicos (biota do solo)	Provisão	Biodiversidade e recursos genéticos
Regulação da população (biota do solo) para controle de pragas, patógenos e doenças	Regulação	Controle de possíveis pragas e patógenos
Eliminação e decomposição de resíduos e poluentes	Regulação	Ações de reciclagem e remediação
Filtração e amortecimento de água	Regulação	Regulação da qualidade da água
Regulação dos fluxos hidrológicos, amortecimento e moderação do ciclo hidrológico	Regulação	Regulação do abastecimento de água e controle de enchentes
Sequestro e acumulação de carbono, regulação da composição química atmosférica e processos climáticos	Regulação	Regulação de GEE atmosférico e regulação climática
Retenção de sedimentos	Regulação	Controle de erosão
Apoio a atividades recreativas	Cultural	Recreação
Apoio a atividades não-comerciais	Cultural	Desenvolvimento de recursos cognitivos, estéticos, educacionais, experiências e atividades espirituais e científicas
Possui registro arqueológico de ocupação terrestre e civilizações	Cultural	Patrimônio histórico e cultural

Fonte: Prado et al. (2016) adaptado de Barrios (2007), Haygarth e Ritz (2009), Dominati et al. (2010).

Segundo Prado et al. (2016), devido às práticas de manejo insustentáveis e o uso excessivo de fertilizantes e pesticidas, tem ocorrido a degradação do solo, resultando em redução dos serviços ecossistêmicos promovidos pelo solo tais como a diminuição da produtividade das culturas e o aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEE).

Para que a prestação de serviços ambientais pelo solo seja sustentável ao longo dos anos, é importante o monitoramento constante para detectar possíveis falhas de manejo que possam comprometer as funções do solo. A utilização de indicadores que possibilitem verificar a qualidade dos solos pode ser uma importante ferramenta para que se realize o manejo correto na agricultura, bem como poderá subsidiar futuros pagamentos por serviços ambientais relacionados às funções do solo.

4.3. Indicadores ambientais na agricultura

Os indicadores de desenvolvimento sustentável servem para identificar variações, comportamentos, processos e tendências; estabelecer comparações entre países e entre regiões dentro do Brasil; indicar necessidades e prioridades para a formulação, promoção, monitoramento e avaliação de políticas. Em 1996 foi publicado o “Livro Azul” pela Comissão de Desenvolvimento Sustentável – CDS das Nações Unidas, que continha 134 indicadores, que em 2000 foram reduzidos para 57 indicadores, acompanhado por fichas metodológicas e diretrizes para sua utilização, sendo que na escolha dos indicadores devem-se levar em conta as especificidades de cada país, desde que se consiga a produção regular de suas estatísticas. Em 2002 o IBGE divulgou 50 indicadores, ampliando para 59 em 2004 e chegando à publicação de 2015 com 63 indicadores nas dimensões: Ambiental, Social, Econômica e Institucional (IBGE, 2015).

A dimensão ambiental está relacionada com a preservação e conservação dos recursos naturais, considerados fundamentais ao benefício das gerações futuras. Os indicadores estão organizados nos temas: atmosfera (emissão de gases de efeito estufa, consumo industrial de substâncias destruidoras da camada de ozônio e concentração de poluentes no ar em áreas urbanas); terra (uso de fertilizantes, uso de agrotóxicos, terras em uso agrossilvipastoril, queimadas e incêndios florestais, desflorestamento na Amazônia Legal, desmatamento nos biomas extra-amazônicos); água doce (qualidade de águas interiores); oceanos, mares e áreas costeiras (balneabilidade, população residente em áreas costeiras); biodiversidade (espécies extintas e ameaçadas de extinção, áreas protegidas, espécies invasoras); saneamento (acesso a serviço de coleta de lixo doméstico, acesso a um sistema de abastecimento de água, acesso a

esgotamento sanitário, tratamento de esgoto) (IBGE, 2015). Permanecem, entretanto, algumas lacunas importantes, entre as quais se destacam: uso da água e sua qualidade, erosão e perda de solo.

Apesar da importância dos solos para a sustentabilidade da agricultura, diversos indicadores utilizados em políticas públicas levam em conta somente a fertilidade e práticas conservacionistas, como por exemplo, os utilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA), com o Programa Produtor de Água (ANA, 2003), e também pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), com o programa Apóia Novo Rural (Rodrigues e Campanhola, 2003) e a Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), com o programa Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas (FERREIRA et al., 2012).

Estes últimos têm sido implementados em diversas propriedades rurais pelo país gerando relatórios de sustentabilidade e funcionando como suporte à decisão de gestão da propriedade agrícola, porém sem maiores efeitos nas decisões de políticas públicas. O programa Apóia Novo Rural possui um módulo complementar para parâmetros biológicos e físicos de solos, que ainda não foi extensivamente testado em campo.

Embora exista o indicador uso de agrotóxicos nos indicadores descritos pelo IBGE, este levantamento é realizado com base nos dados de comercialização fornecidos pelas indústrias produtoras e empresas importadoras de agrotóxicos, pouco informando sobre as áreas de concentração de uso e sobre o real risco de contaminação ambiental. Considerando as dimensões continentais do país e dificuldade de fiscalização e identificação dessas áreas de risco, a avaliação de risco de contaminação por meio de modelos matemáticos tem potencial como ferramenta de monitoramento para coordenar os sistemas de fiscalização junto às Unidades da Federação, possibilitando a territorialização e identificação de áreas de maior risco de contaminação ambiental e, conseqüentemente, passíveis de fiscalização mais próxima.

A utilização de indicadores químicos, físicos e biológicos do solo pode contribuir para a sustentabilidade da produção e demais funções do solo ao longo do tempo, possibilitando a detecção precoce de problemas de manejo e a promoção das correções necessárias.

4.3.1. Indicadores de qualidade do solo

A preocupação com a qualidade dos solos e sua importância para a sustentabilidade da agricultura e a qualidade ambiental teve um incremento a partir da década de 1990. Lal e Pierce (1991), preocupados com a degradação dos solos e contaminação ambiental, argumentam a favor de agroecossistemas que pudessem conciliar a produção com sustentabilidade da agricultura para o futuro.

Vários conceitos de qualidade dos solos surgidos nesta década, como o divulgado pelo Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), indicam a importância da capacidade do solo manter suas funções ao longo do tempo, das quais destacamos: ciclagem de nutrientes (decomposição, mineralização e disponibilização dos nutrientes para as plantas); regularização do fluxo e armazenagem da água (diretamente ligado à presença de macro e microporos); habitat para uma diversidade de plantas, animais e microrganismos (maior diversidade de habitat físico, químico e biológico, quanto maior for o teor de matéria orgânica no solo); filtragem e amortecimento de compostos tóxicos e excesso de nutrientes (atividade altamente dependente dos microrganismos do solo); estabilidade e suporte físico (formação e manutenção dos agregados) (VEZZANI e MIELNICZUK, 2009).

Karlen et al. (1997) define solo saudável aquele que tem a capacidade de funcionar para manter a produtividade vegetal e animal, manter ou melhorar a qualidade do ar e da água e promover a saúde humana, seja nos ecossistemas naturais ou agroecossistemas. Para McBratney et al. (2014), a qualidade do solo é um conceito complexo que envolve a conservação e melhoria dos seus recursos para produzir alimentos, fibras, água doce, energia e ajudar a manter a sustentabilidade climática e a biodiversidade, que na realidade inclui nas funções do solo a função de sequestro de carbono e manutenção da biodiversidade.

Dentre todos os atributos químicos, físicos e biológicos para avaliar a qualidade do solo, a matéria orgânica é o atributo mais importante, pois está ligado a todas as funções do solo, influenciando a estabilidade dos agregados (fundamental para a infiltração, o crescimento das raízes e a resistência à erosão), bem como a ciclagem, retenção e disponibilidade de nutrientes e a diversidade de microrganismos no solo. A estabilidade dos agregados é fundamental para a fertilidade, resistência à compactação e erosão, germinação e enraizamento, além do armazenamento do carbono no solo por meio da proteção física às moléculas orgânicas. Porém, para manutenção desta estabilidade ao longo do tempo é necessário o aporte constante de matéria orgânica na forma de palhada e raízes, principalmente, segundo relatam Vezzani e Mielniczuk (2009).

Além das interações entre clima, vegetação, drenagem e manejo, as propriedades intrínsecas dos solos como textura, mineralogia e estrutura também influenciam na retenção do carbono orgânico do solo (COS). Zinn et al. (2007), avaliaram três solos de Cerrado similares quanto ao clima, vegetação e declive, mas com texturas diferentes. A pesquisa teve como hipótese que a retenção de carbono orgânico no solo é controlada ao mesmo tempo pela textura,

mineralogia e profundidade. Os autores concluíram que existe uma correlação forte entre as concentrações de COS e teores de argila, pela forte sorção de COS solúvel coloidal por uma área maior de superfície, e de silte, por uma textura geral mais fina que favorece a estabilização do COS. O papel da argila na retenção de COS não é homogêneo, sendo essa correlação maior com os teores de óxidos de ferro a alumínio amorfo.

Considerando que diversos fatores influenciam os processos biogeoquímicos e suas variações no tempo e espaço, o que dificulta identificar parâmetros isolados para avaliar a qualidade dos solos, uma série de indicadores biológicos (carbono da biomassa microbiana, respiração basal, dentre outros), físicos (textura, densidade do solo, compactação, infiltração, armazenamento e retenção de água, entre outros) e químicos (pH, teor de nutrientes e outros) foi proposta por Doran e Parkin (1994), relacionando-os com as funções do solo.

Tomando o Cerrado nativo como área de referência, Stefanoski et al. (2013) avaliaram a densidade do solo, resistência a penetração e porosidade total em Latossolos do Cerrado piauiense cultivado sob os sistemas de manejo do solo com plantio convencional e plantio direto. Estes sistemas de manejo não apresentaram diferença significativa quanto à densidade do solo e à porosidade total, sendo que o sistema de plantio direto apresentou diferença significativa destes parâmetros em relação ao Cerrado nativo na camada de 10 a 20 cm. Quanto à resistência à penetração, o plantio convencional apresentou menores valores na camada de 0 a 20 cm em relação ao plantio direto, considerando a mobilização do solo na preparação do cultivo convencional.

A partir da avaliação de quatro tipos de ocupação do solo (pastagem natural, pastagem cultivada, cultivo convencional com culturas anuais e florestamento de pinus), com os seguintes atributos de qualidade: densidade do solo, resistência mecânica à penetração, taxa de infiltração de água, conteúdo de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica, carbono total da biomassa microbiana e respiração basal, em trabalho realizado por Araújo et al. (2007), concluiu-se que os atributos físicos foram os que apresentaram maior diferença entre os sistemas de produção, sendo que os valores mais elevados de densidade foram registrados nas áreas sob pastagem plantada e cultivo convencional, provavelmente pelo pisoteio animal e trânsito de máquinas. Quanto ao teor de matéria orgânica, só foi observada diferença nos primeiros 5 cm de solo, sendo os valores mais elevados para pastagens e Cerrado nativo. Para os atributos biológicos, o carbono da biomassa foi maior na vegetação nativa, enquanto para respiração basal os valores foram similares para o Cerrado nativo e pastagem natural, diferenciando-se dos demais.

A relação dos atributos microbiológicos (carbono da biomassa microbiana, respiração basal e atividade das enzimas beta-glicosidase e fosfatase ácida) com a degradação dos inseticidas bifentrina, permetrina e tiametoxam em solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária, plantio direto e convencional foi avaliada por Portilho et al. (2015), que concluíram que o sistema de integração lavoura-pecuária, em comparação com o plantio direto e convencional, favoreceu incrementos da matéria orgânica do solo, do carbono da biomassa e atividade microbiana, propiciando a degradação mais rápida dos três inseticidas no solo.

Diversos estudos conduzidos na Embrapa Cerrados, com soja e milho sob plantio direto, demonstram os impactos da atividade agrícola com a redução do carbono da biomassa microbiana e das atividades das enzimas fosfatase ácida (ciclo do P orgânico) e arilsulfatase (ciclo do S orgânico). Inversamente, ocorre aumento do carbono mineralizável e atividade da enzima beta-glicosidase (ciclo do C), considerando que a palhada deixada pelo plantio direto é menos complexa e essa enzima atua na etapa final de decomposição da celulose (MENDES et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2001; MATSUOKA et al., 2003; MENDES et al., 2003; CARNEIRO et al., 2004).

A escolha dos indicadores de qualidade do solo foi descrita por Stefanoski et al. (2016), citando outros autores (ANDREWS et al., 2002; SÁNCHEZ-NAVARRO et al., 2015; ROUSSEAU et al., 2012), que podem ser de acordo com: opinião de especialistas, frequência com que os parâmetros aparecem em artigos científicos ou critérios estatísticos por meio da análise de componentes principais. Analisando estes métodos, concluíram que, dentre os métodos estudados, aquele que usa a frequência com que aparecem na literatura foi suficientemente sensível para detectar diferenças na qualidade dos solos de acordo com o uso e manejo. Assim, a seleção de um conjunto mínimo de indicadores pode ser mais útil e adequada do que um conjunto complexo destes. Normalmente o que define os indicadores a serem utilizados é o foco da pesquisa para a comunidade acadêmica.

Há uma diversidade de usuários de indicadores de qualidade do solo, como pesquisadores, agricultores e instituições governamentais, utilizados para uma série de finalidades: avaliação de terras quanto a estágios de conservação e degradação, políticas de pesquisa e financiamentos, monitoramento de práticas de manejo quanto à sustentabilidade, dentre outras (VEZZANI e MIELNICZUK, 2009).

Nesse sentido, os indicadores de qualidade do solo, segundo Doran e Parkin (1994), devem integrar as propriedades físicas, químicas e biológicas a fim de relacionar os diversos processos do agroecossistema, possibilitar o acesso de vários usuários e às diversas utilizações,

bem como ser sensível a variações de manejo e de clima ao longo do tempo e de preferência possuir informações em banco de dados existente, o que facilita a verificação da evolução ao longo do tempo. A praticidade e reprodutibilidade dos indicadores são essenciais para atingir todos os usuários, desde o pesquisador, passando por instituições públicas que desenvolvem políticas para a agropecuária e de extensão, até o agricultor, destinatário final que optará pelo melhor manejo do seu solo. Segundo Arshad e Coen (1992), a adequação de um indicador pode variar de acordo com as características do solo a ser avaliado e com o seu uso, bem como quais as funções do solo são prioridades na avaliação.

Os indicadores de qualidade do solo, segundo Vezzani e Mielniczuk (2009), podem avaliar a variação de qualidade do solo ao longo do tempo dentro de um sistema, sendo que neste caso é desejável que seja sensível a variações em tempo curto, ou comparar diferentes sistemas entre si, não sendo neste caso tão importante a dependência temporal, mas a sua sensibilidade a variações de manejo.

Os indicadores físicos e químicos estão mais difundidos na literatura quanto aos parâmetros e faixas de valores que indicam um bom solo. No caso de indicadores biológicos, considerando que parâmetros e faixas de valores ainda não estão estabelecidos para a maioria dos solos, opta-se por adotar como referência as condições de solo da vegetação nativa com condições naturais preservadas e próximas às áreas a serem estudadas.

O uso dos indicadores microbiológicos como indicadores de qualidade do solo, apesar de ainda não muito difundida em áreas além da pesquisa científica, é justificado pela sua rápida resposta às alterações de manejo (KENNEDY e PAPENDICK, 1995). Dentre os indicadores biológicos, o carbono da biomassa microbiana se destaca.

Chaer e Tótola (2007), comparando atributos químicos, físicos e biológicos em relação ao manejo de área plantada com eucalipto e vegetação nativa, identificaram que os indicadores biológicos são os mais sensíveis à alteração de manejo, sendo que dentro destes, destaca-se a biomassa microbiana, tendo em vista sua atuação na ciclagem de nutrientes, estabilidade dos agregados e biodegradação de poluentes como os agrotóxicos.

Porém, este indicador deve vir acompanhado de algum indicador que possibilite a mensuração da atividade atual e potencial destes microrganismos. Nesse sentido, destacam-se as enzimas do solo, que atuam como catalisadoras de reações de decomposição de resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes, formação de matéria orgânica e consequente estruturação do solo, segundo Mendes e Vivaldi (2001).

Mendes e Reis (2004) avaliam como promissor o uso de indicadores biológicos para verificar os impactos dos sistemas de manejo e uso na qualidade dos solos. Os autores evidenciam a necessidade da criação de um banco de dados com parâmetros biológicos para uma melhor interpretação das análises, uma vez que os indicadores biológicos ajudam numa identificação rápida e precisa de alterações no solo, possibilitando correções de manejo antes que os solos atinjam níveis críticos.

A avaliação do conjunto de indicadores de qualidade do solo pode ser calculada por um índice de qualidade do solo, promovendo uma agregação e simplificação de informações (SANDS e PODMORE, 2000). A geração de índices de qualidade do solo facilita o entendimento e se constitui em ferramenta para avaliar e monitorar o estado do solo e identificar, tanto práticas de manejo que estejam prejudicando sua qualidade, quanto aquelas que possam promover sua recuperação e sustentabilidade. Nesse ponto, são de grande interesse para as políticas públicas para a agricultura, como por exemplo, para o pagamento por serviços ambientais. Considerando que os indicadores são expressos em diferentes unidades, devem ser convertidos em valores adimensionais que variam de 0 a 1. Estes valores, ou pontuação padronizada dos indicadores, é obtida a partir da equação 1 sugerida por Wymore (1993):

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

sendo “PP” a pontuação padrão; “B” o valor na linha base da propriedade do solo, correspondendo à 0,5; “L” é o limite inferior; “S” a inclinação da tangente da curva na linha base e “x” o valor da propriedade do solo apurado nas análises. O valor limite pode ser igual a “1” quando a propriedade do solo está em nível ótimo, ou igual a “0” quando em nível inaceitável. Na linha base, mínimo aceitável, o valor é equivalente ao ponto médio entre os valores limites da propriedade do solo considerada.

Os valores da equação são baseados na experimentação, literatura científica, opinião de especialistas ou em dados de solo em condições de vegetação nativa ou consideradas ideais para produção de culturas específicas, conforme recomenda Karlen et al. (1994).

Glover et al. (2000), avaliando o efeito de três sistemas de produção de maçã sobre a qualidade do solo, descreveram, a partir de uma série de resultados de pesquisas de diversos autores, os dados de limites inferior e superior e as linhas de base inferior e superior, bem como o valor ótimo e a inclinação da curva na linha de base, sendo negativa com inclinação à esquerda e positiva com inclinação à direita.

Silva (2008) e Souza (2011), com o auxílio do software Sistema de Monitoramento da Qualidade do Solo (SIMOQS) desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa (CHAER et al., 2004), avaliaram a qualidade dos solos, por meio dos atributos químicos, físicos e biológicos, em função do manejo, em áreas com plantio direto e convencional para as culturas milho e soja, utilizando áreas adjacentes de vegetação nativa de Cerrado como referência. Quanto aos parâmetros químicos, utilizaram os valores propostos por Sousa e Lobato (2004) para interpretação de análises de solo do Cerrado para culturas anuais. Para os parâmetros biológicos, utilizaram os maiores e menores valores encontrados nas áreas para definir os limites inferior e superior, ficando a linha de base inferior o ponto médio entre estes valores. Silva (2008) utilizou uma margem de 50% para mais e para menos nos maiores e menores valores encontrados, respectivamente.

As equações das funções de pontuação padronizadas podem resultar em três tipos de curva, conforme o indicador utilizado. A matéria orgânica do solo e carbono da biomassa microbiana são exemplos do tipo “mais é melhor”, onde a inclinação da curva “S” é positiva e quanto maior o valor do indicador, maior a sua pontuação padrão. Como “menos é melhor” temos a resistência à penetração e densidade do solo, onde a inclinação da curva “S” é negativa, sendo a pontuação padrão maior quanto menor for o valor do indicador. Por último temos como exemplo o pH, que é do tipo “ótimo”, sendo que o valor da pontuação padrão aumenta com o aumento do valor do indicador até atingir um ponto ótimo, a partir do qual a inclinação da curva “S” se torna negativa e a pontuação padrão diminui com o aumento do valor do indicador, conforme descrito por Chaer (2004).

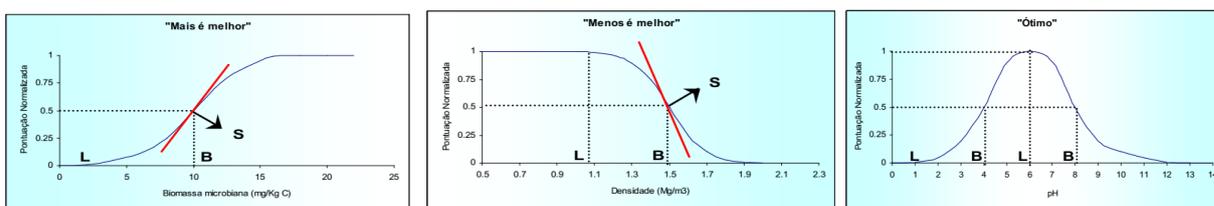


Figura 1. Tipos de curvas de pontuação padronizada utilizadas na normalização dos Indicadores, sendo: L - limite inferior; B - linha base; S - valor da tangente em B.
Fonte: Chaer et al. (2004).

Com a pontuação padronizada podem ser estabelecidos pesos para cada indicador de acordo com a participação da propriedade específica nas funções do solo, tais como: acomodar, reter e fornecer água para plantas; estocagem e reciclagem de nutrientes; promover crescimento da planta; promover a atividade biológica, segundo Chaer (2001).

Araújo et al. (2007) consideram os modelos de avaliação de qualidade de solo que estabelecem pesos de acordo com as funções no solo complexos e de difícil aplicação. Assim, para utilização de fiscalização e controle ambiental, sugerem uma simplificação do método, a partir da comparação direta de indicadores de qualidade do solo produtivo com os de vegetação nativa, sem considerar os indicadores químicos, mas tão somente a matéria orgânica total e a capacidade de troca catiônica são comparáveis neste caso.

Santana e Bahia Filho (2002) propõem dois critérios de referência: solo de área sob vegetação natural, que representa condições estáveis ecologicamente, mais indicados para parâmetros físicos e biológicos, e parâmetros agronômicos ou químicos, mais indicados para a fertilidade do solo que maximizem a produção.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Caracterização da microbacia hidrográfica

A microbacia hidrográfica do Córrego Lamarão localiza-se na parte Sudeste do Distrito Federal, entre as coordenadas geográficas 15°54'50" a 16°01'10" de latitude Sul e 47°25'30" a 47°36'30" de longitude Oeste, conforme destacado na Figura 2. Possui área aproximada de 9.630 ha com suas águas desaguardo no Rio Jardim e seguindo para o Rio Preto, afluente do Rio Paracatu que deságua no Rio São Francisco (MOREIRA e ASSAD, 2000).

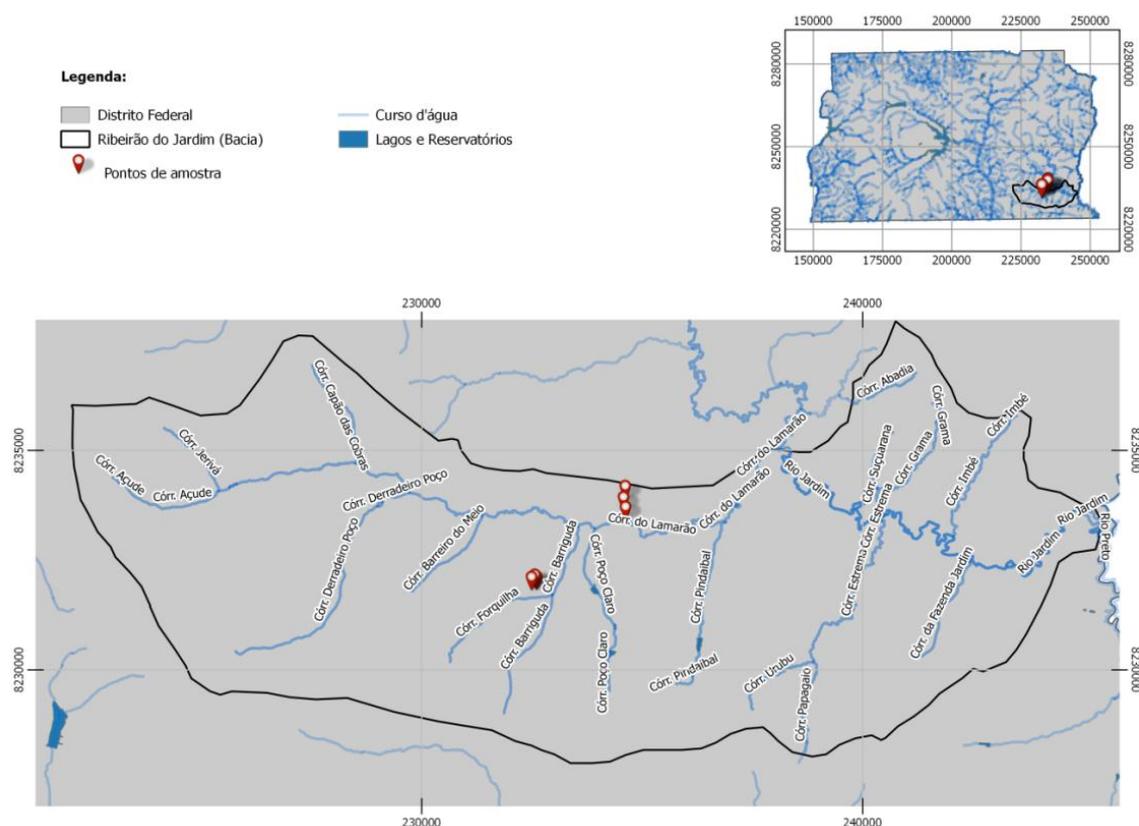


Figura 2. Mapa hidrográfico da Sub Bacia do Rio Jardim e Microbacia do Córrego Lamarão com localização das áreas estudadas.

O clima, segundo a classificação de Köppen, é classificado como Aw, com períodos seco e chuvoso característicos e média de precipitação anual de 1.500 mm, com temperatura média do mês mais frio superior a 18°C (ASSAD, 2001).

Fazem parte da microbacia do Lamarão, 41 pequenas propriedades (até 20 ha ou cinco módulos fiscais) e 28 grandes propriedades (acima de 75 ha), ocorrendo uma grande demanda de água para irrigação com captação superficial, próximo da totalidade, seja para as pequenas propriedades produtoras de hortaliças quanto para as propriedades maiores, que produzem grãos sob pivô central. Consta também nesta microbacia uma agrovila com aproximadamente 50 lotes urbanos (PAIXÃO, 2000).

O conjunto litológico das áreas estudadas é o Grupo Bambuí, ocupando 15% da área do DF, ocorrendo ao longo do Vale do Rio Preto, sendo composto por metassiltitos laminados, bancos de arcóseos e metassiltitos argilosos de muito baixo grau metamórfico (NEUMANN, 2012). No DF ocorrem afloramentos em drenagens, sendo a maior parte recoberta por uma espessa camada de Latossolos (ALMEIDA JUNIOR, 2015).

Os Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo predominam na região, ocupando uma área de 6.669 ha (REATTO, 2000). Porém, a composição dos solos da microbacia é variada, estando presentes solos Hidromórficos, Cambissolos, Argissolos, Neossolos e os Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo, conforme Figura 3.

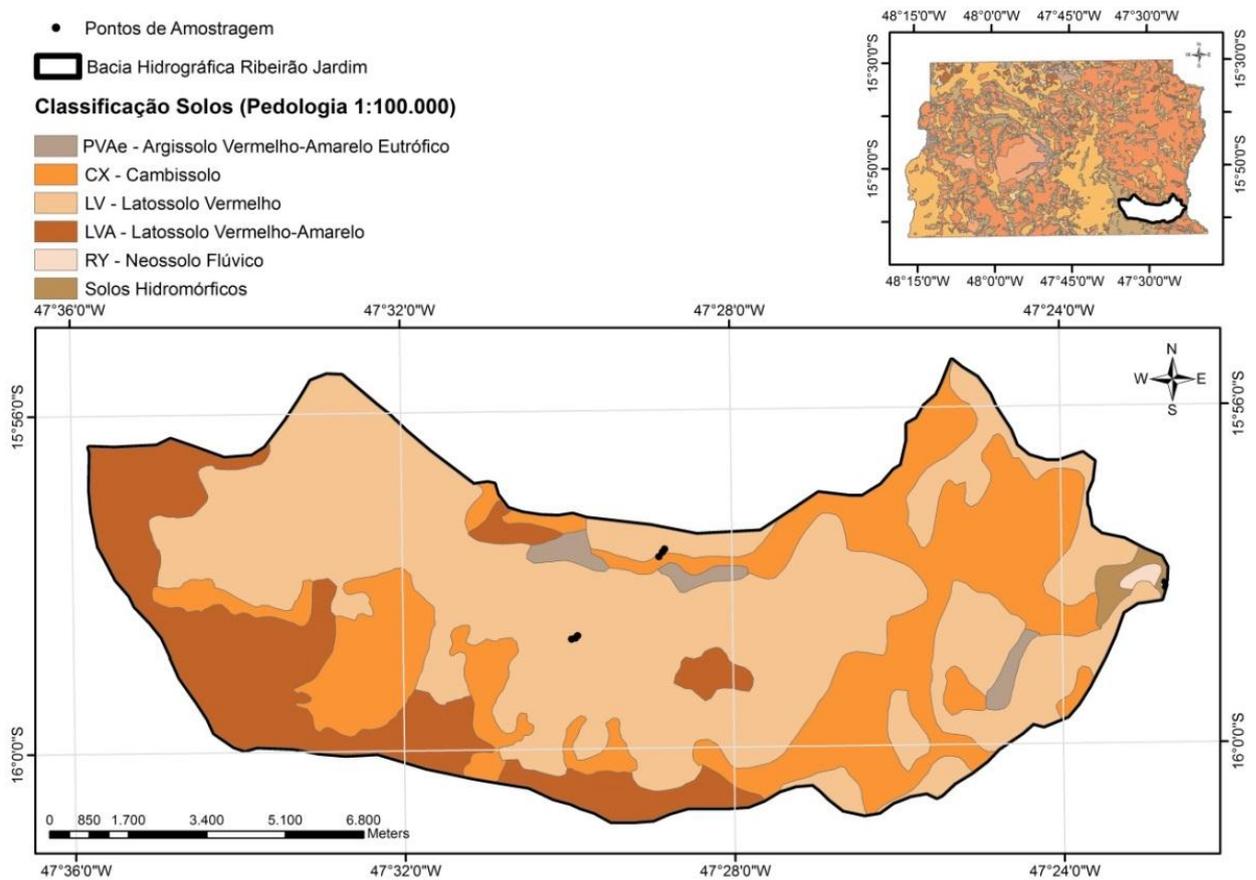


Figura 3. Mapa de solos da Sub Bacia do Rio Jardim e Microbacia do Córrego Lamarão com localização das áreas estudadas.

Fonte: Reatto et al, 2004

5.2. Seleção dos indicadores de solo

Os parâmetros químicos, físicos e biológicos com suas respectivas unidades de medição são apresentados na Tabela 2. Alguns aspectos como a facilidade de medição, a resposta a mudanças no tempo e de manejo e o limite de condições de sustentabilidade bem definido devem ser considerados na escolha de indicadores (GOEDERT e OLIVEIRA, 2007).

Tabela 2. Parâmetros físicos, químicos e biológicos avaliados nos solos das áreas.

Tipo	Parâmetro	Unidade
Físico	Densidade do solo (Ds)	g cm ⁻³
	Resistência mecânica do solo à penetração (RP)	MPa
Químico	Matéria orgânica	dag kg ⁻¹
	CTC	cmol _c dm ⁻³
	pH em água e em CaCl ₂	-
	P e K	mg dm ⁻³
	Ca, Mg, Al e H+Al	cmol _c m ⁻³
	V (saturação de bases)	%
	M (saturação de alumínio)	%
Biológico	Carbono da biomassa microbiana (CBM)	mg C kg ⁻¹ solo
	Atividade enzimática:	
	Arilsulfatase	*µg PNS g ⁻¹ de solo hora ⁻¹
	Fosfatase ácida	*µg PNF g ⁻¹ de solo hora ⁻¹
	Beta-glicosidase	*µg PNG g ⁻¹ de solo hora ⁻¹

* p-nitrofenil sulfato (PNS), p-nitrofenil fosfato (PNF), p-nitrofenil beta-D-glicopiranosídeo (PNG)

Os indicadores químicos foram selecionados com base nos componentes das análises básicas de fertilidade dos solos, considerando a sua facilidade de medição e o fato de serem feitas análises rotineiras pelos produtores rurais, bem como por seus parâmetros definidos de qualidade, auxiliados por tabelas de interpretação de fertilidade para a quase totalidade dos solos brasileiros (SOUSA e LOBATO, 2004). Quanto aos indicadores físicos, optou-se pela medida da densidade do solo e sua resistência à penetração tendo em vista as vantagens do baixo custo, metodologias simples e rápidas, conforme recomendação de Mendes et al. (2006).

Os indicadores biológicos têm a vantagem de responder rapidamente às mudanças no solo tendo em vista os diversos manejos (CHAER e TÓTOLA, 2007). Além do carbono da biomassa, vinculado a diversas funções do solo, foram selecionadas para o presente estudo a atividade das enzimas sensíveis às mudanças de manejo e que identificam a atividade dos microorganismos, como a beta-glicosidase, considerando sua importância na decomposição de resíduos orgânicos do ciclo do carbono, bem como a fosfatase ácida e a arilsulfatase, responsáveis pela ciclagem de nutrientes como o fósforo e enxofre, respectivamente, com base em estudos realizados por Mendes e Vivaldi (2001).

5.3. Seleção das propriedades rurais avaliadas

Após consulta à Emater-DF, Escritório Local do PAD-DF, que identificou possíveis áreas para o estudo. Para seleção das áreas foram levados em consideração dois aspectos: os sistemas de produção utilizados e o tamanho das propriedades representativas da microbacia do córrego Lamarão. As áreas trabalhadas estão identificadas na Figura 4, sendo: grande propriedade orgânica de hortaliças (A), grande propriedade produtora de grãos, com área sob pivô central e de sequeiro (B) e pequena propriedade de hortaliças em sistema convencional (C).



Figura 4. Propriedades selecionadas para coleta e análises de solo: A – grande propriedade orgânica; B – grande propriedade de produção de grãos; C – pequena propriedade de horticultura convencional.

Quanto às áreas a serem estudadas, foi considerada a existência de locais dessas propriedades próximas à vegetação nativa, possibilitando análises comparativas de solo, tendo sido escolhidas seis áreas conforme abaixo identificadas na Figura 5, sendo que a distância máxima entre A1 e A3 é de 500 metros e entre A4 e A6 é de 250 metros:

A1 – Grãos Pivô Central – Milho na fase de pendoamento, plantado em 14/11/2017. Esse plantio foi antecedido pelo plantio de feijão em maio/2017 e milho no início de fevereiro/2017. Altitude de 859 metros. Plantio direto implantado há mais de 10 anos, tendo

sido realizada escarificação à profundidade de 26 cm com o implemento Fox, evitando a inversão do solo.

A2 – Grãos sequeiro – Soja na fase de enchimento dos grãos, plantada em 07/11/2017. Antecedida pelo plantio de milho safrinha em fevereiro/2017. Altitude de 842 metros. Plantio direto implantado há mais de 10 anos, tendo sido realizada escarificação à profundidade de 26 cm com o implemento Fox, evitando a inversão do solo.

A3 – Mata próxima à área de produção de grãos. Altitude de 839 metros.

A4 – Área hortaliça orgânica – couve manteiga em final de colheita. Área de rotação couve manteiga, leguminosas e milho em adubação verde e cebolinha há 4 anos. A cada plantio é passado o rotoencanteirador e feita duas subsolagens por ano. Altitude de 859 metros.

A5 – Área hortaliça convencional – tomate plantado em out/2017 após 8 anos de pastagem com braquiária na área. Foi feito o preparo da área com aração, gradagem e encanteiramento. Altitude de 860 metros.

A6 – Mata próxima às áreas de produção de hortaliça. Altitude de 840 metros.

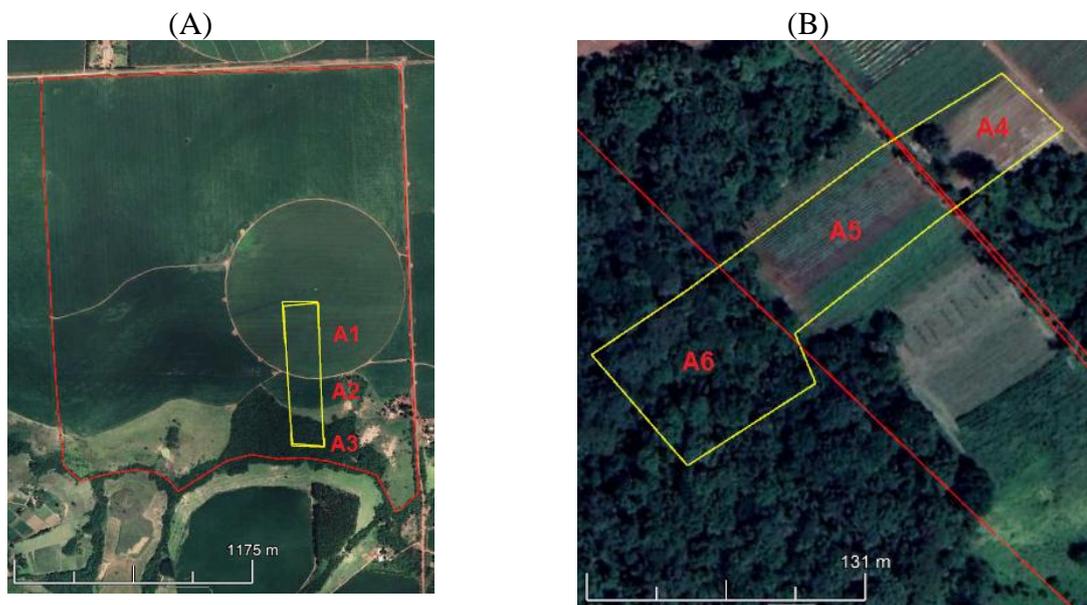


Figura 5. Áreas selecionadas para coleta e análises de solo: (A) A1 – grãos pivô central (milho); A2 – grãos sequeiro (soja); A3 – mata adjacente à área de produção de grãos; e (B) A4 – hortaliça orgânica; A5 – hortaliça convencional; A6 – mata adjacente às áreas de produção de hortaliça.

5.4. Levantamento de dados

5.4.1 Entrevista com produtores

Foram realizadas entrevistas abertas para levantamento de dados com relação aos sistemas de produção utilizados e histórico de culturas plantadas.

5.4.2 Coleta das amostras de solo

A coleta das amostras de solo foi realizada no período chuvoso em janeiro de 2018 em seis áreas de três propriedades rurais representativas da microbacia, conforme descritas no item 5.3. Mendes e Reis (2004) concluíram que indicadores de atividade enzimática podem detectar mudanças no funcionamento do solo, principalmente quando a amostragem é realizada na profundidade de 0 a 5 cm e na época chuvosa, preferencialmente na fase de máximo desenvolvimento das culturas (floração). Apesar das culturas estarem em fases diferentes na época da amostragem, optou-se pela coleta em data única para todas as análises. A soja encontrava-se em fase de enchimentos dos grãos, o milho na fase de pendoamento, o tomate em fase de produção e a couve em fase final de colheita. A amostragem foi feita por caminhamento aleatório, sendo que para as hortaliças as amostras foram coletadas nos canteiros, enquanto para as culturas de grãos foi intercalada nas linhas e entrelinhas de cultivo.

Para a análise de densidade do solo pelo método do anel volumétrico, foram coletadas cinco amostras indeformadas por área, totalizando trinta amostras, por meio de anel de aço de bordas cortantes e volume interno de aproximadamente 100 cm³ (EMBRAPA, 2011). Quanto à resistência à penetração, foram realizadas três perfurações com penetrômetro de impacto até a profundidade de 20 cm, em um raio de 30 cm em volta de cada área, com coleta de amostra indeformada com anel de densidade, totalizando noventa perfurações nas áreas estudadas. Com a finalidade de corrigir diferenças de umidade nos solos testados com relação à compactação, foram realizadas coletas de solo com trado holandês nas profundidades de 0 a 20 cm para análise de umidade, num total de trinta amostras, segundo recomendação de Stolf et al. (1983).

As amostras para análises biológicas foram coletadas a uma profundidade de 0 a 10 cm com trado holandês. Para análise do carbono da biomassa microbiana foram coletadas cinco amostras compostas por área, sendo estas compostas por cinco subamostras retiradas em um raio de um metro do local escolhido. Após a retirada, as amostras foram acondicionadas em isopor com refrigeração, conforme Vance et al. (1987). Para as análises de atividade enzimática (beta-glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase), foi coletada uma amostra composta por área, oriundas de cinco subamostras coletadas nas linhas das culturas, segundo recomendação de Tabatabai (1994).

As amostras para análise de fertilidade e textura do solo foram coletadas com trado holandês a uma profundidade de 0 a 20 cm, sendo uma amostra composta por área de estudo originária de quinze subamostras. As subamostras foram homogeneizadas para compor amostras de aproximadamente 500 gramas (EMBRAPA, 2011).

5.4.3 Análises físicas, químicas, biológicas e classificação dos solos

Nas análises físicas, foram realizadas análises de densidade do solo pelo método do anel volumétrico. Considerando que os anéis possuem volumes variáveis, o volume dos anéis foi calculado pela média de três medidas internas nos anéis, que fornece as áreas, multiplicado pela média de três medidas da altura. A densidade do solo (D_s) é dada pela equação 2:

$$D_s = \frac{\text{massa de solo (g)}}{\text{volume do anel (cm}^3\text{)}} \quad (2)$$

Também foram realizados testes de resistência do solo à penetração nas profundidades de 0 a 10 e 10 a 20 cm, considerando que é a profundidade de maior concentração das raízes das culturas e que todas as medidas dos outros indicadores de qualidade do solo foram realizadas até esta profundidade, sendo registrados o número de impactos necessários para a penetração de cada 10 cm (STOLF; FERNANDES; NETO, 1983). Estes dados foram convertidos em Mega Pascal - MPa, de acordo com Stolf (1990), utilizando a equação 3:

$$R(\text{kgf cm}^{-2}) = 5,6 + 6,89N \quad (3)$$

onde N = número de impactos para penetrar 10 cm em cada uma das profundidades medidas (0-10 e 10-20 cm). A resistência a penetração, em MPa, é calculada pela equação 4:

$$R(\text{MPa}) = 0,0980665 \cdot R(\text{kgf cm}^{-2}) \quad (4)$$

As análises químicas foram realizadas pelo Centro de Tecnologia Agrícola e Ambiental (CAMPO), localizado em Paracatu (MG). Os teores de P e K foram extraídos com o extrator Mehlich 1 e determinados por meio de espectrofotometria de ionização de chama para o K e pela espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES) para o P, de acordo com Embrapa (2009). As amostras foram secas ao ar e submetidas as análises. Cálcio, magnésio e alumínio foram extraídos com cloreto de potássio 1N, com determinação por ICP-OES. Os teores de matéria orgânica foram determinados pelo método colorimétrico descrito por Raij et al. (2001).

As análises biológicas de atividade enzimática foram realizadas pela empresa incubada da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Assessoria e Treinamentos (ANDRIOS), localizada em Piracicaba (SP). As quantificações das atividades enzimáticas basearam-se na determinação colorimétrica da p-nitrofenol que é liberado pelas atividades enzimáticas alvos de estudo, quando encontradas no solo incubado com uma solução tamponada com os respectivos substratos. A determinação de beta-glicosidase baseou-se na determinação colorimétrica da p-nitrofenol que é liberada pelas beta-glicosidasas encontradas no solo quando este é incubado durante uma hora, com uma solução tamponada de p-nitrofenil-

Beta-D-glicopiranosídeo (PNG). A determinação da fosfatase ácida foi feita com base na determinação colorimétrica da p-nitrofenol que é liberada pelas fosfatases encontradas no solo quando este é incubado durante uma hora, com uma solução tamponada de p-nitrofenil fosfato (PNF). A determinação da arilsulfatase baseia-se na determinação colorimétrica da p-nitrofenol que é liberada pelas sulfatases encontradas no solo quando este é incubado durante uma hora, com uma solução tamponada de p-nitrofenil sulfato (PNS) (TABATABAI, 1994).

O carbono da biomassa microbiana foi analisado pelo método da irradiação-extração em forno de micro-ondas, sendo três amostras de 20 gramas irradiadas e três não irradiadas. O carbono da biomassa microbiana, tanto das amostras irradiadas quanto das não irradiadas foi extraído com K_2SO_4 , e titulado com dicromato de potássio para a determinação do carbono que foi liberado da biomassa microbiana, metodologia descrita em Mendonça e Matos (2005)

Quanto à textura, foram realizadas análises de solos coletados nas profundidades de 0 a 20 cm, 30 a 50 cm e 80 a 100 cm. O método utilizado foi o do densímetro, conforme descrito no Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017). A coloração dos horizontes A e B foram identificadas por meio da Carta de Munsell® e a classificação dos solos foi realizada de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS, 2013).

5.5 Análises estatísticas

Considerando que as áreas são pequenas e com baixa variabilidade, as análises químicas e de enzimas foram realizadas por meio de amostras compostas de solo, não tendo sido analisada a variabilidade entre as subamostras. Para as análises físicas e de carbono da biomassa microbiana, como foram analisadas várias subamostras, individualmente, foi possível a análise estatística descritiva, com cálculo da média, desvio padrão e coeficiente de variação, além dos testes de Kruskal-Wallis e Dunn.

O teste de Kruskal-Wallis, conforme descrito por Vieira (2010), é um teste não paramétrico para verificar se três ou mais populações têm a mesma distribuição. Apesar de ser uma alternativa para a análise de variância, o teste não compara médias ou a hipótese de igualdade de medianas. Neste teste, utilizando o software R, os dados de cada área foram ordenados em conjunto e é atribuído um posto a cada dado, começando com o posto 1 para o dado de menor valor até o último posto para o dado de maior valor. Posteriormente, foram calculados os somatórios dos postos de cada área e respectivas médias de postos que são comparadas para verificar diferenças significativas.

A partir da identificação de diferenças significativas, realizou-se o Teste de Dunn, que comparou as áreas duas a duas e indicou aquelas que apresentaram diferenças significativas

entre os seus postos médios, conforme proposto por Vieira (2010). Neste teste, calculou-se o posto médio de cada área pela equação 5:

$$R = \frac{\sum R_i}{n_i} \quad (5)$$

Posteriormente foram calculados a variância dos postos pela equação 6 e o erro padrão para cada par de postos médios, conforme equação 7.

$$S^2 = \frac{n(n+1)}{12} \quad (6)$$

$$S_{(R)} = \sqrt{\frac{n(n+1)}{12} \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \quad (7)$$

A partir do cálculo do erro padrão, foram calculadas as estatísticas de teste para comparar os postos médios dois a dois pela equação 8.

$$q = \frac{R_i - R_j}{S_{(R)}} \quad (8)$$

5.6 Cálculo e comparação dos escores dos indicadores de qualidade dos solos

Com o objetivo de possibilitar a comparação e a construção do índice de qualidade dos solos, os dados dos indicadores levantados pelas análises dos solos das áreas de cultivo e das vegetações nativas adjacentes foram padronizados conforme equação (1). A linha de base “B” é igual ao escore 0,5 na padronização, representando o valor crítico, onde os valores acima ou abaixo são considerados insuficientes com relação à qualidade do solo, conforme a inclinação da curva de cada indicador. A inclinação da curva é dada pela seguinte equação utilizada no software Sistema de Monitoramento da Qualidade do Solo (SIMOQS) (CHAER, 2001):

$$S = \frac{k_s}{(LS - B)} \quad (9)$$

onde, S é a inclinação da curva, LS é o limite superior do indicador e k_s é uma constante para ajuste das curvas que pode variar de 1,0 a 1,5, com o padrão igual a 1,25, de acordo com informações obtidas junto ao autor do software SIMOQS.

A padronização das pontuações no intervalo de 0 a 1 possibilitou comparar os diversos indicadores de solo e verificar se atendem ao valor mínimo “B”, correspondente ao valor intermediário deste intervalo e avaliar quais precisam ser melhorados. Os parâmetros utilizados para os indicadores no cálculo dos escores foram obtidos pelos métodos matemático e de tabelas de parâmetros, estabelecidos na literatura, onde os valores de linha de base foram obtidos de

valores críticos para a qualidade do solo, conforme Tabela 3. No caso de indicadores químicos, foram considerados valores críticos os valores mínimos do intervalo tido por adequado utilizando os dados de publicação de interpretação de dados para solos de Cerrado, presentes em Sousa e Lobato (2004). Para os indicadores biológicos foram utilizados parâmetros extraídos de tabela com classes interpretativas para indicadores microbianos em Latossolo Vermelho argiloso do Cerrado, em função do carbono orgânico do solo maior que $18,2 \text{ g kg}^{-1}$, conforme Lopes et al. (2013). No caso dos indicadores físicos, foram utilizados dados críticos de densidade do solo (ANDRADE e STONE, 2009) e resistência à penetração (IMHOFF, 2000).

Para o método matemático, foi escolhido um parâmetro intermediário entre o utilizado por Souza (2011), que utiliza como limites as maiores e menores médias obtidas nas análises, e o utilizado por Silva (2008), que utiliza uma margem de 50% para mais e para menos nas maiores e menores médias respectivamente. As áreas foram divididas em dois grupos: Grupo 1 - áreas de cultivo de grãos em plantio direto com respectiva vegetação nativa adjacente e Grupo 2 - áreas com horticultura e respectiva vegetação nativa. Os valores do limite inferior e superior foram calculados para cada indicador multiplicando os menores e os maiores valores de cada indicador observados nas análises de todos os solos, em seus respectivos grupos, por 0,85 e 1,15, respectivamente, com uma margem de 15% para mais e para menos. O limite de base “B” correspondeu à média dos valores desses limites. Os parâmetros obtidos pelo método matemático constam das tabela 4, com resultados do Grupo 1, e tabela 5, com resultados do Grupo 2. A partir dos cálculos dos escores dos indicadores, pelos métodos matemático e de tabelas padronizadas, foi realizada uma comparação para avaliar a influência do método no cálculo dos escores e possíveis explicações para as divergências encontradas.

Tabela 3. Parâmetros das funções de pontuação dos indicadores de qualidade de solo – Método Tabelas Padronizadas.

Indicador	Tipo de curva	Unidade	LI	LS	S	LBI	LBS	Ótimo	Referências
Propriedades Físicas									
Densidade do solo	(-) é melhor	g cm ⁻³	0,5	2,0	-1,667		1,25		Andrade e Stone (2009)
Resistência à penetração (0 a 20 cm)	(-) é melhor	MPa	0,0	2,5	-1,25		1,25		Imhoff et al. (2000)
Propriedades Químicas									
pH em água	Ótimo		5,0	8,0	1,2500	5,5	7,5	6,5	Lopes (1998)
Matéria orgânica (textura argilosa)	(+) é melhor	dag kg ⁻¹	0,0	6,2	0,4032	3,1			Sousa e Lobato (2004)
Matéria orgânica (textura muito argilosa)	(+) é melhor	dag kg ⁻¹	0,0	7,2	0,3472	3,6			Sousa e Lobato (2004)
Fósforo (P) – sistema sequeiro, teor de argila maior que 60%	(+) é melhor	mg dm ⁻³	0	8,2	0,3049	4,1			Sousa e Lobato (2004)
Fósforo (P) – sistema sequeiro, teor de argila de 36 a 60%	(+) é melhor	mg dm ⁻³	0	16,2	0,1543	8,1			Sousa e Lobato (2004)
Fósforo (P) - sistema irrigado	(+) é melhor	cmol _c dm ⁻³	0	24,2	0,1033	12,1			Sousa e Lobato (2004)
Cálcio (Ca)	(+) é melhor	cmol _c dm ⁻³	0	3,0	0,8333	1,5			Sousa e Lobato (2004)
Magnésio (Mg)	(+) é melhor	cmol _c dm ⁻³	0	1,0	2,5000	0,5			Sousa e Lobato (2004)
Potássio (K) CTC > 4	(+) é melhor	mg dm ⁻³	0	102	0,0245	51			Sousa e Lobato (2004)
Alumínio trocável (Al ⁺³)	(-) é melhor	cmol _c dm ⁻³	0	0,3	-8,3333	0,15			Sousa e Lobato (2004)
Acidez potencial (H + Al)	(-) é melhor	cmol _c dm ⁻³	2	5	-0,8333	3,5			Sousa e Lobato (2004)
CTC (pH 7) – solo argiloso	(+) é melhor	cmol _c dm ⁻³	0	18,2	0,1374	9,1			Sousa e Lobato (2004)
CTC (pH 7) – solo muito argiloso	(+) é melhor	cmol _c dm ⁻³	0	24,2	0,1033	12,1			Sousa e Lobato (2004)
Saturação de bases (V%)	(+) é melhor	%	0	72	0,0347	36			Sousa e Lobato (2004)
Propriedades Biológicas									
CBM	(+) é melhor		0	810	0,0025	405			Lopes et al. (2013)
Arilsulfatase	(+) é melhor	µg PNS g ⁻¹ de solo hora ⁻¹	0	180	0,0139	90			Lopes et al. (2013)
Fosfatase ácida	(+) é melhor	µg PNF g ⁻¹ de solo hora ⁻¹	0	2300	0,0011	1150			Lopes et al. (2013)
Beta glicosidase	(+) é melhor	µg PNG g ⁻¹ de solo hora ⁻¹	0	280	0,0089	140			Lopes et al. (2013)

LI – limite inferior, LS – limite superior, S – inclinação da curva, LBI – limite de base inferior, LBS – limite de base superior e Ótimo – melhor valor de pH a partir do qual a curva torna-se descendente. Observação: ocorre diferença significativa entre os limites de base inferior e superior de acordo com o método utilizado (matemático ou tabela), acarretando também diferença nas inclinações das respectivas curvas. p-nitrofenil sulfato (PNS), p-nitrofenil fosfato (PNF), p-nitrofenilβ-D-glicopiranosídeo (PNG)

Tabela 4. Parâmetros das funções de pontuação dos indicadores de qualidade de solo do Grupo 1 – Método matemático (+- 15%).

Indicador	Tipo de curva	Unidade	LI	LS	S	LBI	LBS	Ótimo	Parâmetro
Propriedades Físicas									
Densidade do solo	(-) é melhor	g cm ⁻³	0,8	1,3	-4,9358		1,15		MI e MS
Resistência à penetração (0 a 10 cm)	(-) é melhor	MPa	1,2	2,3	-2,2883		1,75		MI e MS
Resistência à penetração (10 a 20 cm)	(-) é melhor	MPa	1,3	3,0	-1,4526		2,15		MI e MS
Propriedades Químicas									
pH em água	Ótimo		4,7	6,7	2,5063	5,2	6,2	5,7	MI e MS
Matéria orgânica	(+) é melhor	dag kg ⁻¹	2,9	5,3	1,0417	4,1			MI e MS
Fósforo (P)	(+) é melhor	mg dm ⁻³	3,1	42,2	0,0639	22,6			MI e MS
Cálcio (Ca)	(+) é melhor	cmol _c dm ⁻³	2,2	3,6	1,8450	2,9			MI e MS
Magnésio (Mg)	(+) é melhor	cmol _c dm ⁻³	1,1	2,4	1,9084	1,8			MI e MS
Potássio (K)	(+) é melhor	cmol _c dm ⁻³	65,9	358,8	0,0085	212,3			MI e MS
Alumínio trocável (Al ⁺³)	(-) é melhor	cmol _c dm ⁻³	0,085	0,115	-83,333	0,100			MI e MS
Acidez potencial (H + Al)	(-) é melhor	cmol _c dm ⁻³	3,57	7,02	-0,7257	5,29			MI e MS
CTC (pH 7)	(+) é melhor	cmol _c dm ⁻³	7,7	13,3	0,4394	10,5			MI e MS
Saturação de bases (V%)	(+) é melhor	%	40,0	61,00	0,1190	50,5			MI e MS
Propriedades Biológicas									
CBM	(+) é melhor		278,2	1124,1	0,0030	701,1			MI e MS
Arilsulfatase	(+) é melhor	μg PNS g ⁻¹ de solo hora ⁻¹	50,0	427,8	0,0066	238,9			MI e MS
Fosfatase ácida	(+) é melhor	μg PNF g ⁻¹ de solo hora ⁻¹	550,8	939,6	0,0064	745,2			MI e MS
Beta glicosidase	(+) é melhor	μg PNG g ⁻¹ de solo hora ⁻¹	62,6	140,3	0,0322	101,5			MI e MS

Limite superior = MS × 1,15 e limite inferior = MI × 0,85 onde MS e MI são as maiores médias superiores e menores médias inferiores observadas nas análises dos solos das áreas estudadas.

p-nitrofenil sulfato (PNS), p-nitrofenil fosfato (PNF), p-nitrofenilβ-D-glicopiranosídeo (PNG)

Tabela 5. Parâmetros das funções de pontuação dos indicadores de qualidade de solo do Grupo 2 – Método matemático (+- 15%).

Indicador	Tipo de curva	Unidade	LI	LS	S	LBI	LBS	Ótimo	Parâmetro
Propriedades Físicas									
Densidade do solo	(-) é melhor	g cm ⁻³	0,6	1,1	-5,3648		0,85		MI e MS
Resistência à penetração (0 a 10 cm)	(-) é melhor	MPa	0,6	1,8	-2,0695		1,2		MI e MS
Resistência à penetração (10 a 20 cm)	(-) é melhor	MPa	0,7	2,7	-1,2758		1,7		MI e MS
Propriedades Químicas									
pH em água	Ótimo		4,8	7,9	1,5337	5,6	7,2	6,4	MI e MS
Matéria orgânica	(+) é melhor	dag kg ⁻¹	4,3	8,9	0,5429	6,6			MI e MS
Fósforo (P)	(+) é melhor	mg dm ⁻³	3,0	51,5	0,0515	27,2			MI e MS
Cálcio (Ca)	(+) é melhor	cmol _c dm ⁻³	5,7	10,6	0,5118	8,15			MI e MS
Magnésio (Mg)	(+) é melhor	cmol _c dm ⁻³	2,2	3,6	1,8450	2,9			MI e MS
Potássio (K)	(+) é melhor	cmol _c dm ⁻³	160,7	224,3	0,0393	192,5			MI e MS
Alumínio trocável (Al ⁺³)	(-) é melhor	cmol _c dm ⁻³	0,085	0,104	-135,1351	0,09			MI e MS
Acidez potencial (H + Al)	(-) é melhor	cmol _c dm ⁻³	1,45	10,01	-0,2921	5,73			MI e MS
CTC (pH 7)	(+) é melhor	cmol _c dm ⁻³	12,3	21,6	0,2690	16,9			MI e MS
Saturação de bases (V%)	(+) é melhor	%	45,9	101,2	0,0452	73,55			MI e MS
Propriedades Biológicas									
CBM	(+) é melhor		235,4	1701,8	0,0017	968,6			MI e MS
Arilsulfatase	(+) é melhor	µg PNS g ⁻¹ de solo hora ⁻¹	72,5	403,7	0,0075	238,1			MI e MS
Fosfatase ácida	(+) é melhor	µg PNF g ⁻¹ de solo hora ⁻¹	272,0	1068,4	0,0031	670,2			MI e MS
Beta glicosidase	(+) é melhor	µg PNG g ⁻¹ de solo hora ⁻¹	52,0	130,0	0,0321	91,0			MI e MS

Limite superior = MS × 1,15 e limite inferior = MI × 0,85 onde MS e MI são as maiores médias superiores e menores médias inferiores observadas nas análises dos solos das áreas estudadas.

p-nitrofenil sulfato (PNS), p-nitrofenil fosfato (PNF), p-nitrofenilβ-D-glicopiranosídeo (PNG)

5.7 Cálculo dos índices de qualidade dos solos

A padronização dos indicadores possibilitou o cálculo dos índices de qualidade de cada solo, considerando as seguintes funções do solo: recebimento, armazenamento e suprimento de água; promoção do crescimento das raízes; armazenamento, suprimento e ciclagem nutrientes; promoção da atividade biológica. A Tabela 6 representa esquematicamente o cálculo do IQS.

Tabela 6. Estrutura do modelo para determinação do índice de qualidade do solo (IQS).

Funções	Escore	Peso	Produto	Indicadores	Escore	Peso	Produto
Função 1	EF ₁	PF ₁	EF ₁ x PF ₁ (IQS _{F1})	Indicador 1.1	EI _{1.1}	PF _{1.1}	EI _{1.1} x PI _{1.1}
				Indicador 1.2	EI _{1.2}	PF _{1.2}	EI _{1.2} x PI _{1.2}
				Indicador 1.n	EI _{1.n}	PF _{1.n}	EI _{1.n} x PI _{1.n}
							$\sum EF_1$
Função 2	EF ₂	PF ₂	EF ₂ x PF ₂ (IQS _{F2})	Indicador 2.1	EI _{2.1}	PF _{2.1}	EI _{2.1} x PI _{2.1}
				Indicador 2.2	EI _{2.2}	PF _{2.2}	EI _{2.2} x PI _{2.2}
				Indicador 2.n	EI _{2.n}	PF _{2.n}	EI _{2.n} x PI _{2.n}
							$\sum EF_2$
Função i	EF _i	PF _i	EF _i x PF _i (IQS _{Fi})	Indicador i.1	EI _{i.1}	PF _{i.1}	EI _{i.1} x PI _{i.1}
				Indicador i.2	EI _{i.2}	PF _{i.2}	EI _{i.2} x PI _{i.2}
				Indicador i.n	EI _{i.n}	PF _{i.n}	EI _{i.n} x PI _{i.n}
							$\sum EF_i$
Índice de Qualidade do Solo			$\sum IQS_{FiPFi}$				

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 ($0 \leq EI' \leq 1$); IQS – índice de qualidade do solo

No cálculo do IQS final essas funções do solo possuem pesos iguais correspondendo a 25% para cada. Essas funções estão associadas a um conjunto de indicadores com pontuação padronizada (EI), que multiplicados pelo seu respectivo peso (PI) resulta na sua participação no escore da função (EI x PI). A soma desses resultados (EI x PI) resulta no escore da respectiva função. A partir da soma dos produtos dos escores das funções (EF) multiplicados pelos seus respectivos pesos (PF), obtém-se o IQS. Os indicadores e respectivos pesos constam da Tabela 7. Os pesos atribuídos aos indicadores das funções dos solos foram estabelecidos de acordo com a literatura e a opinião de especialistas nas características químicas, físicas e biológicas de solos.

Tabela 7. Parâmetros e respectivos pesos utilizados para cálculo dos Índices de Qualidade do Solo (IQS) de acordo com a função do solo.

Funções do solo	Peso (%)	Indicadores Nível 1	Peso (%)	Indicadores Nível 2	Peso (%)	
Receber, armazenar e suprir água	25,00	Matéria Orgânica	80,00			
		Densidade do solo	20,00			
Promover o crescimento das raízes	25,00	Compactação do solo	25,00	Densidade do solo	50,00	
				Resistência à penetração (0 a 20 cm)	50,00	
		Acidez/toxidez de Al	25,00	pH	33,33	
				Acidez potencial (H+Al)	33,33	
				Alumínio trocável (Al+3)	33,33	
		Matéria orgânica	25,00	25,00	Fósforo (P)	38,50
					Cálcio (Ca)	20,50
		Nutrientes minerais	25,00	25,00	Magnésio (Mg)	20,50
					Potássio (K)	20,50
Armazenar, suprir e ciclar nutrientes	25,00	Matéria orgânica	20,00			
				Nutrientes biomassa microbiana (CBM)	27,00	
		Atividade microbiana	27,00	Arilsulfatase	33,33	
				Fosfatase ácida	33,33	
				Beta glicosidase	33,33	
		CTC (pH 7)	16,00			
Saturação de bases (V%)	10,00					
Promover a atividade biológica	25,00	Matéria orgânica	25,00			
				pH	20,00	
		CBM	20,00			
				Atividade microbiana	20,00	
		Atividade microbiana	20,00	Arilsulfatase	33,33	
				Fosfatase ácida	33,33	
				Beta glicosidase	33,33	
		Nutrientes minerais	15,00	Fósforo (P)	38,50	
				Cálcio (Ca)	20,50	
				Magnésio (Mg)	20,50	
Potássio (K)	20,50					

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Classificação dos solos

Segundo coordenadas obtidas por meio do GPS nas localidades de retirada das amostras de solo, a plotagem no mapa de solos, identificou-se as seguintes classificações de solo: áreas A1, A2, A4, A5 e A6 em Latossolo Vermelho, gerando incertezas com relação ao solo da área A3, transição entre Latossolo Vermelho e Cambissolo, conforme figura 6.

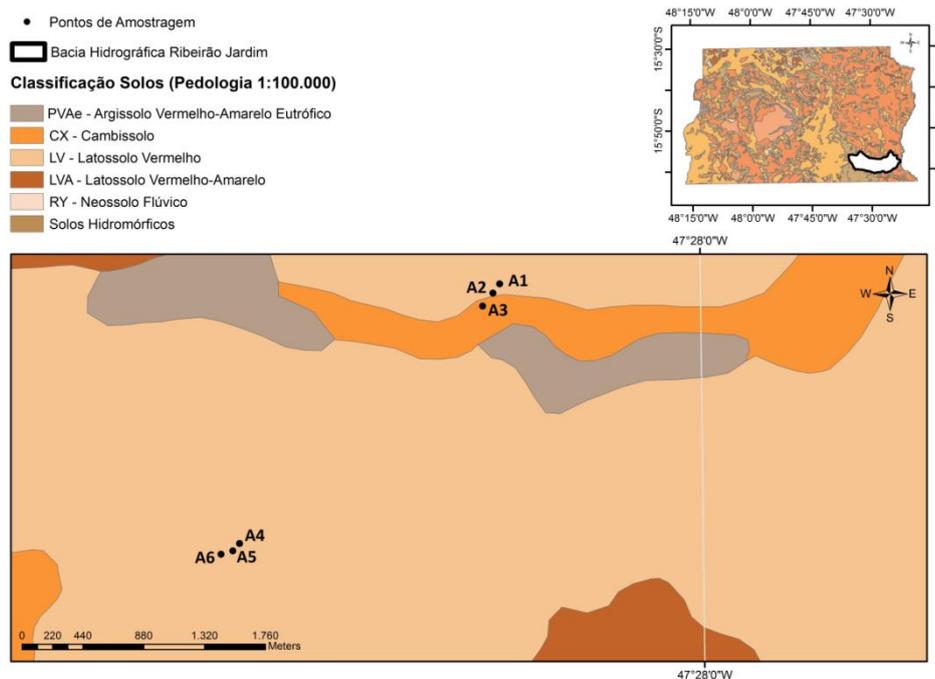


Figura 6 – Mapa de solos com detalhamento da identificação das áreas estudadas.
Fonte: Reatto et al, 2004

Para verificar a classificação dos solos, foi feita uma classificação expedita dos solos das áreas em estudo, com resultados de análise química, matéria orgânica, textura e cor, conforme Tabela 8.

Tabela 8. Parâmetros para classificação dos solos das áreas estudadas.

Área	Horizonte	Análises químicas + MO						Textura			Cor	CTC Argila	RT*	R S/A**	
		C. Oorg.	M.O.	CTC	pH em água	pH em CaCl ₂	Al+3	V%	Argila	Silte					Areia
A1 - Milho pivô central	A	2,30	4,00	10,10	5,50	5,00	< 0,1	47	58,1	23,0	18,9	5YR 4/4	17,4		0,4
	B	0,30	0,60	4,20	5,70	5,40	< 0,1	67	62,1	20,0	17,9	5YR 4/6	6,8	1,1	0,3
A2 - Soja sequeiro	A	2,00	3,40	9,00	5,80	5,00	< 0,1	53	54,5	28,3	17,2	5YR 4/6	16,5		0,5
	B	0,30	0,50	3,70	5,10	4,70	< 0,1	56	61,8	23,5	14,7	2.5YR 5/8	6,0	1,1	0,4
A3 - Mata nativa grãos	A	2,60	4,60	11,60	5,60	4,90	0,1	47	47,6	33,7	18,8	7.5YR 4/3	24,4		0,7
	B	0,60	1,00	5,60	5,20	4,60	< 0,1	50	58,5	15,6	25,9	5YR 5/8	9,6	1,2	0,3
A4 - Horticultura orgânica	A	2,90	5,00	14,50	6,90	6,60	< 0,1	88	52,7	23,6	23,8	5YR 4/4	27,5		0,4
	B	0,90	1,50	6,20	5,90	5,40	< 0,1	61	73,0	10,7	16,3	2.5YR 4/8	8,5	1,4	0,4
A5 - Horticultura convencional	A	3,40	5,80	15,40	6,30	5,80	< 0,1	64	49,6	21,7	28,7	5YR 4/4	31,0		0,4
	B	0,80	1,40	6,00	5,00	4,50	< 0,1	50	74,6	8,7	16,7	2.5YR 4/6	8,0	1,5	0,1
A6 - Mata nativa horticultura	A	4,50	7,70	18,80	5,70	5,20	< 0,1	54	61,0	17,0	22,0	5YR 4/4	30,8		0,3
	B	1,00	1,80	5,70	5,50	5,10	< 0,1	52	72,6	11,1	16,3	2.5YR 5/8	7,9	1,2	0,2

*RT (relação textural) de argila do horizonte B / horizonte A; *R S/A (relação silte/argila).

Observação: horizonte A (solo analisado de 0 a 20 cm) e horizonte B (solo analisado de 80 a 100 cm).

A partir destes dados os solos foram classificados como Latossolo Vermelho segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013), consideradas as seguintes

características: CTC argila menor que 17 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ para o horizonte B; incremento da fração argila do horizonte A para o horizonte B pouco expressivo; relação textural horizonte B/horizonte A menor que 1,5, não podendo ser caracterizado como B textural; matiz de cor 2,5YR ou mais vermelho na maior parte dos primeiros 100 cm (EMBRAPA, 2013).

6.2. Propriedades químicas, físicas e biológicas dos solos

A Tabela 10 mostra os resultados das análises físicas dos solos. Obteve-se uma menor resistência à penetração nos primeiros 20 cm nas áreas com hortaliças, seja de cultivo orgânico ou convencional, considerando o revolvimento dessa faixa de solo para o plantio, conforme constatado também por Stefanovski et al. (2013).

As áreas com grãos, com soja e milho sob plantio direto, apresentaram as maiores resistências à penetração, principalmente, na profundidade de 10 a 20 cm, com resultado próximo e acima do valor crítico de 2,5 MPa, conforme classificação de Imhoff et al. (2000). As áreas com vegetação nativa, adjacentes às áreas de grãos e de hortaliças, apresentaram valores altos de resistência à penetração, principalmente a partir dos 10 cm de profundidade, provavelmente devido à interferência de raízes nos resultados dos testes, corroborado pelos coeficientes de variação dos resultados obtidos na profundidade de 10 a 20 cm, respectivamente de 27 e 28%. Em relação à densidade do solo, todas as áreas obtiveram valores abaixo do valor crítico de $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$, conforme valores apresentados por Andrade e Stone (2009).

Tabela 9. Características físicas dos solos estudados.

Áreas	Densidade do solo (g.cm^{-3}) (0 a 10 cm)			Resistência à penetração - R (MPa) (0 a 10 cm)			Resistência à penetração - R (MPa) (10 a 20 cm)		
	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
A1 - Milho pivô central	1,15	0,05	4	1,97	0,40	20	2,37	0,44	18
A2 - Soja sequeiro	1,07	0,06	5	1,54	0,30	20	2,62	0,29	11
A3 - Mata nativa grãos	0,96	0,16	16	1,38	0,15	11	1,52	0,40	27
A4 - Horticultura orgânica	0,93	0,10	10	0,73	0,15	21	0,82	0,15	18
A5 - Horticultura convencional	0,90	0,07	8	1,07	0,15	14	1,07	0,15	14
A6 - Mata nativa horticultura	0,71	0,12	17	1,59	0,26	16	2,31	0,64	28

Áreas A1 e A2 com plantio direto

O Teste de Kruskal-Wallis, conforme dados de saída do sistema constante do Anexo I, indicou diferenças significativas na distribuição dos dados para as análises de densidade do solo e resistência à penetração nas profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm. A tabela 10 apresenta os resultados do Teste de Dunn realizado para identificar diferenças significativas na comparação dos postos médios dos dados de análise das áreas duas a duas. Com relação à

densidade do solo, os destacam-se a área 1 que, com exceção da área 2, apresentou diferença significativa para todas as demais áreas diferença significativa para as áreas 1,2 e 3. O destaque do teste para o indicador de resistência à penetração é a área 4, que obteve diferenças significativas para todas as demais áreas, com exceção para a área 5 na profundidade de 0 a 10 cm.

Tabela 10. Teste de Dunn para os resultados de análises físicas dos solos estudados.

Indicador	Áreas					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Densidade do solo	A2	ns				
	A3	*	ns			
	A4	*	ns	ns		
	A5	*	ns	ns	ns	
	A6	**	**	*	ns	ns
Resistência à penetração (0 a 10 cm)	A1					
	A2	ns				
	A3	*	ns			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	*	
Resistência à penetração (10 a 20 cm)	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3	ns	**			
	A4	**	**	**		
	A5	**	**	ns	ns	
	A1					
	A2	ns				
	A3					

no ciclo do carbono na etapa final do processo de decomposição da celulose e as áreas com cultura agrícola de grãos com plantio direto apresentam resíduos menos complexos que os originários da vegetação nativa, segundo relatos de Tabatabai (1994).

Tabela 11. Carbono da biomassa e atividade enzimática dos solos estudados.

Áreas	Enzimas (0 a 10 cm)			Carbono da biomassa microbiana (0 a 10 cm)		
	Arilsulfatase	Fosfatase ácida	Beta- glicosidase	Média kg ha ⁻¹	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
	µg PNS g ⁻¹ solo hora	µg PNF g ⁻¹ solo hora	µg PNG g ⁻¹ solo hora			
A1 - Milho pivô central	58,8	707,0	99,8	489,87	29,92	6
A2 - Soja sequeiro	84,9	648,0	122,0	422,76	82,10	19
A3 - Mata nativa grãos	372,0	817,0	73,7	839,87	125,33	15
A4 - Horticultura orgânica	120,0	320,0	61,2	370,47	76,38	21
A5 - Horticultura convencional	85,3	666,0	89,7	365,85	63,25	17
A6 - Mata nativa horticultura	351,0	929,0	113,0	1.316,02	161,49	12

Áreas A1 e A2 com plantio direto

Também para o indicador carbono da biomassa microbiana o Teste de Kruskal-Wallis indicou diferenças significativas na distribuição dos dados. A tabela 12 apresenta os resultados do Teste de Dunn, com destaque para as áreas 6, que, com exceção da área 3, apresentou diferença significativa para todas as demais áreas, e a área 1, que só apresentou diferença significativa para a área 6.

Tabela 12. Teste de Dunn para os resultados de carbono da biomassa microbiana dos solos estudados.

		A1	A2	A3	A4	A5
Carbono da biomassa microbiana	A2	ns				
	A3	ns	*			
	A4	ns	ns	**		
	A5	ns	ns	**	ns	
	A6	*	**	ns	**	**

A1 - Milho pivô central; A2 - Soja sequeiro; A3 - Mata nativa grãos; A4 - Horticultura orgânica; A5 - Horticultura convencional; A6 - Mata nativa horticultura.

ns = não significativo, * significativo com 5% probabilidade, ** significativo com 1% de probabilidade.

A Tabela 13 apresenta os resultados das análises químicas dos solos. A área de mata nativa adjacente às áreas de horticultura, que possui uma textura muito argilosa no horizonte A em relação à textura argilosa das demais áreas, possui a maior variação com relação à matéria orgânica em relação às áreas de horticultura adjacente. A variação do teor de matéria orgânica entre as áreas de grãos e respectiva vegetação nativa adjacente é menor, considerando que a

composição da matéria orgânica do solo, 95 a 99% são de frações mortas, relativamente estáveis e resistentes às alterações de manejo, sendo que mudanças significativas nestas frações levam muito tempo, conforme observações de Rice et al. (1996). As áreas de horticultura possuem resultados superiores de matéria orgânica em relação às áreas de grãos devido ao aporte recente de adubação orgânica no plantio. Como esperado, os resultados para a CTC tenderam a aumentar com o aumento do conteúdo de matéria orgânica nos solos analisados. Quanto aos indicadores químicos de fertilidade do solo, o P obteve valores mais baixos para as áreas de vegetação nativa, com teores abaixo do adequado, enquanto os demais indicadores como K, Ca e Mg apresentaram teores que indicaram valores adequados ou superiores, segundo valores indicados por Sousa e Lobato (2004). Além dos teores desses nutrientes, também os valores de pH dos solos ficaram igual ou maior que 5,5, divergindo dos resultados obtidos por Ker (1998) para Latossolos. A fertilidade natural da área de vegetação nativa, principalmente, a mata adjacente à horticultura pode estar relacionada ao material de origem, haja visto que existem camadas com material carbonático na coluna estratigráfica do grupo Bambuí que abrange a área de estudo.

Tabela 13. Análises químicas dos solos estudados.

Áreas	pH água	pH CaCl ₂	M.O. dag Kg ⁻¹	C Org %	P mg dm ⁻³	K mg dm ⁻³	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Al ³⁺ cmol _c dm ⁻³	H+Al cmol _c dm ⁻³	CTC cmol _c dm ⁻³	V %	m %
A1 - Milho pivô central	5,5	5,0	4,0	2,3	36,7	77,5	3,0	1,5	<0,1	5,4	10,1	47,0	0,0
A2 - Soja sequeiro	5,8	5,0	3,4	2,0	18,4	162,7	3,1	1,3	<0,1	4,2	9,0	53,0	0,0
A3 - Mata nativa grãos	5,6	4,9	4,6	2,6	3,6	312,0	2,6	2,1	0,1	6,1	11,6	47,0	2,0
A4 - Horticultura	6,9	6,6	5,0	2,9	44,8	189,0	9,2	3,1	<0,1	1,7	14,5	88,0	0,0
A5 - Horticultura	6,3	5,8	5,8	3,4	28,7	191,6	6,7	2,6	<0,1	5,6	15,4	64,0	0,0
A6 - Mata nativa horticultura	5,7	5,2	7,7	4,5	3,5	195,0	6,9	2,7	<0,1	8,7	18,8	54,0	0,0

Al³⁺: acidez trocável; H+Al: acidez potencial; V (%): saturação de bases; m (%): saturação de alumínio.

6.3. Cálculo dos escores

Diversos estudos utilizam tabelas padronizadas para o cálculo dos escores dos indicadores físicos e químicos, bem como as médias dos valores encontrados nos experimentos para identificar os limites superior e inferior no cálculo dos escores para os indicadores biológicos. Chaer (2004), para os indicadores biológicos, considerou zero o limite inferior e como limite superior à média dos valores encontrados nos tratamentos. Silva (2008) e Souza (2011) calcularam os escores biológicos de qualidade do solo pelo método matemático, em áreas com plantio direto e convencional, além da vegetação nativa de Cerrado. Utilizaram como

parâmetros os maiores e menores valores encontrados nas áreas para definir os limites inferior e superior, sendo que Silva (2008) utilizou uma margem de 50% para mais e para menos nos maiores e menores valores encontrados respectivamente. Obtiveram valores de linha de base bem diversificados, tanto entre as suas pesquisas quanto entre os manejos de solo intrapesquisa. Valores divergentes também em relação à tabela desenvolvida por Lopes et al. (2013).

Neste estudo foram realizados os cálculos pelo método aqui denominado de “Método de Tabelas Padronizadas”, mais utilizado na literatura para indicadores físicos e químicos, onde foram utilizados dados da literatura considerados como adequados para indicadores físicos, químicos (CHAER, 2001; SILVA, 2008; SOUZA, 2011) e biológicos (LOPES, 2013), bem como pelo método aqui denominado de “Método Matemático”, mais utilizado na literatura para indicadores biológicos (CHAER, 2001; SILVA, 2008; SOUZA, 2011), que utiliza os maiores e menores valores obtidos pelas análises dos solos para definição das linhas de base superior e inferior. Neste estudo foi definida uma margem de 15% para mais e para menos, respectivamente.

6.3.1 Escores “Método Tabelas Padronizadas”

Os escores pelo método Tabelas Padronizadas foram obtidos conforme parâmetros constantes da Tabela 3 e calculados de acordo com as equações (1) e (5). A Tabela 14 apresenta os escores obtidos por este método para os indicadores biológicos. Os escores para o indicador carbono da biomassa microbiana apresentaram valores abaixo do limite inferior para as áreas de horticultura, indicando que o manejo de preparo do solo e ausência de cobertura morta estão afetando este indicador para além do que seria adequado. Apesar dos escores de carbono da biomassa microbiana para as áreas de grãos em plantio direto serem maiores que a linha de base, as atividades enzimáticas ficaram abaixo desta linha, demonstrando a importância de se complementar a análise com estes indicadores.

Todos os solos apresentaram escores críticos para a beta-glicosidase, indicando que a palhada do plantio direto não tem sido suficiente para manutenção da atividade dessa enzima. Os escores da atividade da fosfatase ácida foram menores nas áreas de cultivo. Segundo Mendes e Reis (2004), sem a entrada de fósforo via adubos minerais solúveis, a solubilização desse elemento é feita principalmente pela mineralização do fósforo da matéria orgânica pelas fosfatases, ocorrendo uma redução de sua atividade pelo efeito inibidor da adubação fosfatada. Mesmo com resultados melhores nas áreas de vegetação nativa, estes não alcançaram o escore da linha de base, demonstrando menor atividade que o desejável. No caso da arilsulfatase, as maiores atividades foram constatadas nas vegetações nativas, que atingiram o escore máximo

de pontuação padronizada, o que foi também observado por Oliveira (2000), que evidenciou a importância da ciclagem do enxofre orgânico pela arilsulfatase nas áreas nativas. Além dessas constatações, somente na área de horticultura orgânica foi atingido o escore mínimo para um solo de boa qualidade. Não foi observada correspondência da atividade da arilsulfatase com o teor de matéria orgânica, o que também foi observado por Speir (1984), que concluiu que cada solo tem sua característica típica de atividade enzimática, que pode ser influenciada pelo grau de evolução da matéria orgânica ou tipo de vegetação que lhe deu origem. Tisdale et al. (1993) relatam que os ânions $H_2PO_4^-$ e SO_4^{4-} competem entre si pelos mesmos sítios de adsorção nos colóides do solo, sendo o primeiro adsorvido, preferencialmente, concluindo em seu experimento que as maiores atividades da arilsulfatase podem estar associadas a uma deficiência de S acarretada pelos altos teores de P. Tal hipótese pode ter ocorrido com uma maior atividade na área de horticultura orgânica em relação às demais áreas cultivadas, que possui 32,7% e 143,5% mais fósforo que as áreas de milho sob pivô central e soja de sequeiro, respectivamente. Balota (2013) descreve a influência negativa dos agroquímicos na atividade enzimática, sendo também uma hipótese para a menor atividade da arilsulfatase nas áreas de cultivo com utilização de agroquímicos.

Tabela 14. Escores dos indicadores biológicos - Método Tabelas Padronizadas.

Áreas	Arilsulfatase	Fosfatase ácida	Beta-glicosidase	Carbono da biomassa microbiana (0 a 10 cm)
A1 - Milho pivô central	0,147	0,123	0,190	0,696
A2 - Soja sequeiro	0,430	0,096	0,344	0,539
A3 - Mata nativa grãos	1,000	0,188	0,080	0,980
A4 - Horticultura orgânica	0,843	0,016	0,049	0,408
A5 - Horticultura convencional	0,435	0,104	0,139	0,392
A6 - Mata nativa horticultura	1,000	0,276	0,275	1,000

Áreas A1 e A2 com plantio direto

A Tabela 15 apresenta os escores obtidos para os indicadores físicos pelo Método de Tabelas Padronizadas. Os escores dos indicadores físicos indicam que em todas as áreas foram atingidos os valores mínimos da linha de base para densidade do solo. Porém, quando se verifica os escores de resistência à penetração, diferentemente das áreas de horticultura que obtiveram escores altos nas profundidades de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm, as áreas com grãos sob plantio direto apresentaram escores abaixo da linha de base, podendo ser indicativo de problemas de compactação. Quanto às áreas de mata nativa, somente na profundidade de 0 a 10 cm a mata nativa adjacente à área de grãos apresentou escore aceitável, enquanto a área de vegetação

nativa adjacente às áreas de horticultura apresentou escores de resistência à penetração abaixo da linha de base em ambas profundidades, possivelmente, pela interferência das raízes nos testes de penetração.

Tabela 15. Escores dos indicadores físicos - Método Tabelas Padronizadas.

Áreas	Densidade do solo	Resistência à penetração (0 a 10 cm)	Resistência à penetração (10 a 20 cm)
A1 - Milho pivô central	0,661	0,085	0,011
A2 - Soja sequeiro	0,770	0,450	0,003
A3 - Mata nativa grãos	0,878	0,646	0,475
A4 - Horticultura orgânica	0,899	0,989	0,977
A5 - Horticultura convencional	0,918	0,901	0,901
A6 - Mata nativa horticultura	0,983	0,389	0,015

Áreas A1 e A2 com plantio direto

A Tabela 16 apresenta os escores obtidos para os indicadores químicos pelo método de Tabelas Padronizadas. Quanto aos indicadores químicos de fertilidade do solo, com exceção do P, que foi baixo para as áreas de vegetação nativa, com escore abaixo da linha de base, os demais indicadores como K, Ca e Mg apresentaram teores próximos ou maiores que o limite superior, com escores próximos ou igual à unidade. Além dos teores desses nutrientes, também os valores de pH dos solos ficaram acima da linha de base, mesmo na vegetação nativa. Quanto à matéria orgânica, todas as áreas apresentaram escores superiores à linha de base, corroborando com o fato de que a análise da matéria orgânica isoladamente não consegue diferenciar solos com propensão à degradação.

Tabela 16. Escores dos indicadores químicos - Método Tabelas Padronizadas.

Áreas	pH em água	M.O.	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	CTC	V
A1 - Milho pivô central	0,500	0,811	1,000	0,933	0,995	1,000	0,885	0,001	0,634	0,823
A2 - Soja sequeiro	0,822	0,619	0,999	1,000	0,996	1,000	0,885	0,086	0,486	0,916
A3 - Mata nativa grãos	0,623	0,921	0,051	1,000	0,977	1,000	0,844	0,000	0,799	0,823
A4 - Horticultura orgânica	0,959	0,958	1,000	1,000	1,000	1,000	0,885	1,000	0,953	1,000
A5 - Horticultura convencional	0,987	0,989	0,999	1,000	1,000	1,000	0,885	0,001	0,972	0,982
A6 - Mata nativa horticultura	0,733	0,997	0,324	1,000	1,000	1,000	0,885	0,000	0,943	0,927

Al³⁺: acidez trocável; H+Al: acidez potencial; V: saturação de bases; áreas A1 e A2 com plantio direto.

6.3.2 Escores Método Matemático

Os escores obtidos pelo Método Matemático para os Grupos 1 e 2 foram obtidos conforme parâmetros constantes das Tabelas 4 e 5, sendo calculados de acordo com as equações (1) e (5). Nesse método os escores tendem aos extremos quando se tem valores muito acima ou abaixo dos indicadores, independentemente do nível adequado do indicador para a qualidade do solo.

A Tabela 17 descreve os escores obtidos para os indicadores biológicos pelo Método Matemático. Os maiores e menores valores dos indicadores foram multiplicados por 1,15 e 0,85, respectivamente, para a obtenção dos limites superior e inferior. No caso da atividade enzimática da arilsulfatase, como os resultados das áreas de vegetação nativa foram altos, seu escores ficaram próximos do máximo e os escores das demais áreas ficaram próximos de zero. O mesmo ocorreu com os escores de carbono da biomassa microbiana, com valores altos para as áreas de vegetação nativa de cada grupo e os escores das áreas cultivadas ficando próximos a zero. Para a fosfatase ácida, como o valor da área de horticultura orgânica foi bem inferior aos demais, uma vez que esta área apresentou teor de P bem acima que as demais, resultou na elevação do escore da área de horticultura convencional, chegando próximo à linha de base para este indicador. No grupo 1, como a variação entre o máximo e mínimo valores foi menor que no grupo 2, os escores das áreas de cultivo obtiveram valores bem abaixo da linha de base, apesar dos valores serem próximos e até maiores que a área de horticultura convencional. Com a atividade da beta-glicosidase, como os valores da vegetação nativa do grupo 1 foi bem mais baixo, o escore da soja sequeiro ficou próximo da unidade e da área de milho bem próxima da linha de base. O grupo 2 obteve resultado semelhante, com o escore da horticultura orgânica próximo de zero, a vegetação nativa próximo da unidade e da horticultura convencional próximo da linha de base.

Tabela 17. Escores dos indicadores biológicos - Método matemático.

Áreas	Arilsulfatase	Fosfatase ácida	Beta-glicosidase	Carbono da biomassa microbiana (0 a 10 cm)
A1 - Milho pivô central	0,000	0,272	0,446	0,072
A2 - Soja sequeiro	0,007	0,069	0,936	0,041
A3 - Mata nativa grãos	0,974	0,866	0,017	0,771
A4 - Horticultura orgânica	0,018	0,003	0,011	0,009
A5 - Horticultura convencional	0,001	0,487	0,459	0,008
A6 - Mata nativa horticultura	0,970	0,965	0,946	0,881

Áreas A1 e A2 com plantio direto

A Tabela 18 descreve os escores obtidos para os indicadores físicos pelo método matemático. Por este método, as áreas de cultura de grãos e de horticultura apresentaram escores abaixo do limite de base inferior quando comparadas com as vegetações nativas respectivas para o indicador densidade do solo. Para a resistência à penetração, no grupo 1 a área de mata nativa apresentou escore próximo à unidade, enquanto que somente para a soja de sequeiro até 10 cm de profundidade ocorreu escore acima da linha de base. No grupo 2 ocorreu uma inversão, onde as áreas de cultivo com hortaliças obtiveram escores altos em detrimento da vegetação nativa adjacente com escores bem baixos, considerando que as áreas de horticultura foram revolvidas para o plantio, obtendo valores de resistência à penetração muito baixos. Os escores abaixo do limite de base inferior para a resistência à penetração para a área de vegetação nativa adjacente à horticultura se deve, por este método, em parte, possivelmente, pela resistência à penetração causada pelas raízes e reforçada pela diferença em relação aos altos escores obtidos pelas áreas de horticultura.

Tabela 18. Escores dos indicadores físicos – Método matemático.

Áreas	Densidade do solo	Resistência à penetração (0 a 10 cm)	Resistência à penetração (10 a 20 cm)
A1 - Milho pivô central	0,167	0,089	0,219
A2 - Soja sequeiro	0,496	0,841	0,060
A3 - Mata nativa grãos	0,901	0,966	0,985
A4 - Horticultura orgânica	0,117	0,994	0,997
A5 - Horticultura convencional	0,203	0,784	0,966
A6 - Mata nativa horticultura	0,945	0,044	0,036

Áreas A1 e A2 com plantio direto.

A Tabela 19 descreve os escores obtidos para os indicadores químicos pelo método matemático. Quanto aos escores do indicador matéria orgânica, somente as áreas de vegetação nativa nos seus respectivos grupos obtiveram escores acima da linha de base, sendo que somente a área cultivada com milho ficou próxima da linha de base. Apesar das áreas de horticultura terem apresentado valores de matéria orgânica acima de todas as áreas do grupo 1, seus escores foram menores devido a área de vegetação nativa do grupo 2 ter apresentado um valor de matéria orgânica superior às demais áreas do grupo, rebaixando seus escores. O mesmo ocorreu com o indicador CTC para estas áreas. Com exceção do indicador pH e o alumínio trocável, que apresentaram escores acima da linha de base inferior para todas as áreas, devido à baixa variação dos valores, para todos os demais indicadores ocorreram escores diversos, tendo em vista a alta variação de valores.

Tabela 19. Escores dos indicadores químicos – Método matemático.

Áreas	pH em água	M.O.	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	CTC	V
A1 - Milho pivô central	0,966	0,407	0,975	0,001	0,697	0,116	0,975	0,423	0,333	0,159
A2 - Soja sequeiro	0,978	0,045	0,252	0,152	0,829	0,019	0,975	0,969	0,060	0,772
A3 - Mata nativa grãos	0,988	0,895	0,000	0,970	0,102	0,933	0,500	0,085	0,876	0,159
A4 - Horticultura orgânica	0,847	0,024	0,976	0,367	0,900	0,829	0,914	0,999	0,058	0,934
A5 - Horticultura convencional	0,990	0,160	0,574	0,467	0,042	0,102	0,914	0,536	0,152	0,148
A6 - Mata nativa horticultura	0,631	0,926	0,000	0,599	0,067	0,198	0,914	0,028	0,879	0,019

Al³⁺: acidez trocável; H+Al: acidez potencial; V: saturação de bases; áreas A1 e A2 com plantio direto.

6.4 Comparação dos escores entre os Métodos de Tabelas Padronizadas e Matemático

6.4.1. Indicadores biológicos

Com relação aos indicadores biológicos, conforme mostra a Figura 7, estes apresentaram muitas diferenças entre os métodos de Tabelas Padronizadas (A) e o Matemático (B). O carbono da biomassa microbiana, pelo método de tabelas, apresenta escores inferiores à linha de base somente para as áreas de horticultura, justificado pelo revolvimento do solo no plantio e falta de cobertura morta do solo. Pelo método matemático, este indicador apresentou escores inferiores à linha de base também para as áreas de cultura de grãos em plantio direto.

Quanto aos escores para as atividades enzimáticas, estes também se mostraram divergentes. A atividade da arilsulfatase no método de tabelas obteve escores superiores nas áreas de vegetação nativa e também na área de horticultura orgânica, diferentemente do método matemático, com escores acima da linha de base somente para as áreas de vegetação nativa, que obtiveram valores bem superiores aos escores das demais áreas dos seus respectivos grupos. Para a fosfatase ácida e beta-glicosidase, enquanto no método de tabelas nenhuma das áreas obteve escore superior à linha de base, no método matemático, para a fosfatase ácida, as áreas de vegetação nativa obtiveram escores acima da linha de base, e para a beta-glicosidase, as áreas de mata nativa adjacente ao cultivo de grãos e horticultura orgânica obtiveram escores bem baixos, com as demais áreas com escores acima ou bem próximos da linha de base.

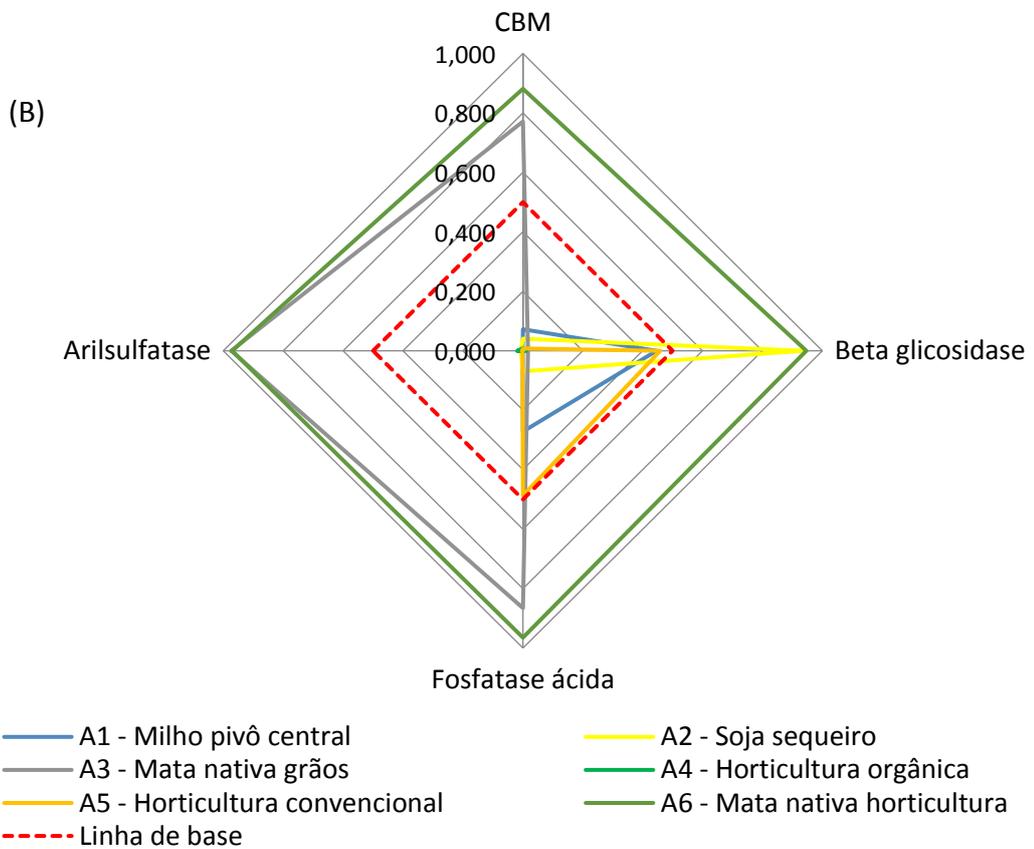
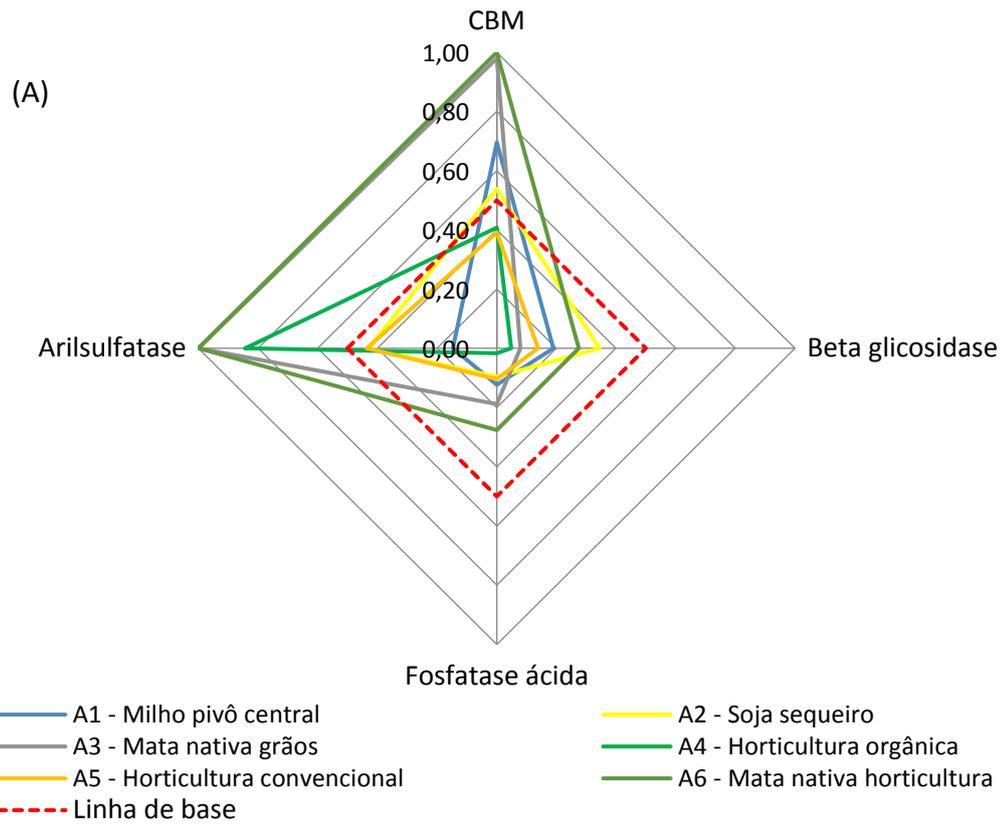


Figura 7. Comparação entre os indicadores biológicos do solo em relação à linha de base pelo método de tabelas de parâmetros (A) e método matemático (B).

6.4.2. Indicadores físicos

A Figura 8 descreve as diferenças observadas entre os escores dos indicadores físicos do solo obtidos pelos métodos de tabelas padronizadas (A) e o matemático (B).

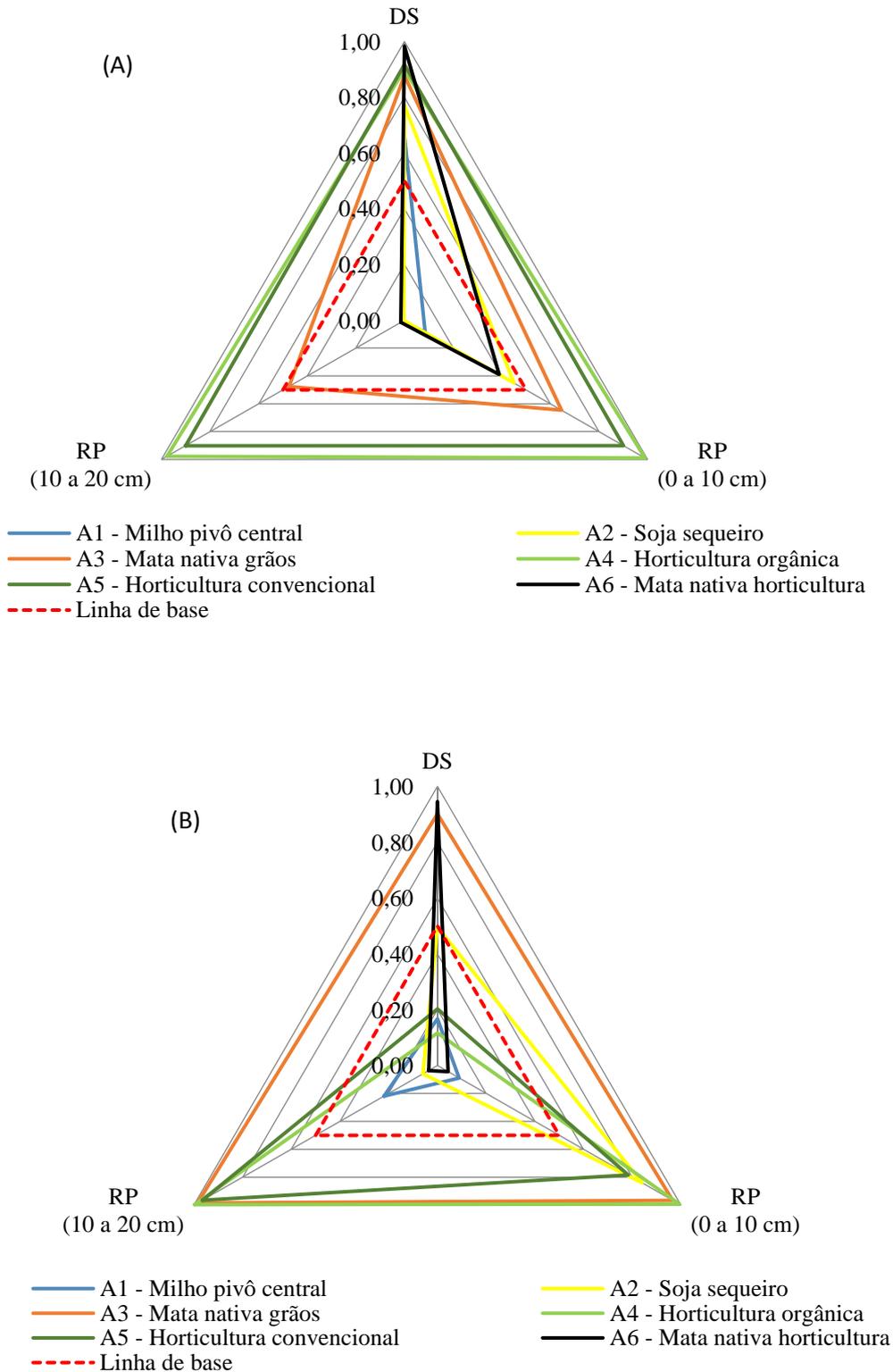


Figura 8. Comparação entre os indicadores físicos do solo em relação à linha de base pelo método de tabelas de parâmetros (A) e método matemático (B).

Apesar dos valores de densidade do solo encontrados nas áreas de cultivo de grãos, de 1,15 e 1,07 g cm⁻³ para milho e soja, respectivamente, e 0,93 e 0,90 g cm⁻³ para as áreas de horticultura orgânica e convencional respectivamente, todas abaixo do limite de linha de base de 1,25 g cm⁻³, pelo método matemático, os escores destas áreas foram inferiores à linha de base, tendo em vista os valores das áreas de vegetação nativa terem sido bem menores que das outras áreas do seu respectivo grupo. Quanto ao indicador de resistência à penetração, os escores dos dois métodos apresentaram similaridade, apesar das áreas de soja sequeiro (0 a 10 cm) e mata nativa adjacente ao cultivo de grãos (10 a 20 cm) terem obtido escores menores que a linha de base, porém ficando bem próximo desta.

6.4.3. Indicadores químicos

A Figura 9 descreve as diferenças observadas entre os escores dos indicadores químicos do solo, obtidos pelos métodos de tabelas padronizadas (A) e o método matemático (B). Para matéria orgânica, principal indicador da qualidade do solo, enquanto no método de tabelas padronizadas foram observados escores acima da linha de base para todas as áreas, o método matemático obteve escore acima da linha de base apenas para as áreas de vegetação nativa, tendo em vista estas terem apresentado valor deste indicador bem acima das demais áreas do seu respectivo grupo, elevando a linha de base pelo método matemático. A CTC acompanhou os escores da matéria orgânica, tanto no método de tabelas, ficando abaixo, mas bem próximo da linha de base, somente na área de cultivos de soja, enquanto no matemático apresentou escores acima da linha de base somente para as áreas de vegetação nativa.

Quanto ao potássio, cálcio e magnésio e a saturação de bases, pelo método de tabelas, todas as áreas apresentaram escores próximos da unidade, enquanto pelo método matemático apresentaram resultados de escores diversificados entre as áreas, sendo que na maioria delas os escores foram abaixo da linha de base. Para o pH em água, os escores guardaram certa coerência entre os dois métodos, com todos os escores acima da linha de base, considerando que não ocorreram valores extremos e que a curva deste indicador é do tipo ótimo, com valores acima e abaixo deste ponto.

Quanto ao fósforo, os escores obtidos pelo método de tabelas padronizadas guardam coerência, com escores altos para as áreas de cultivos e baixos para as áreas de vegetação nativa. Diverge para o método matemático principalmente para a área de cultivo de soja, que por este método obteve escore abaixo da linha de base, considerando que o alto valor desse nutriente na área de milho irrigado, o dobro da área de soja, elevou o patamar da linha de base neste método.

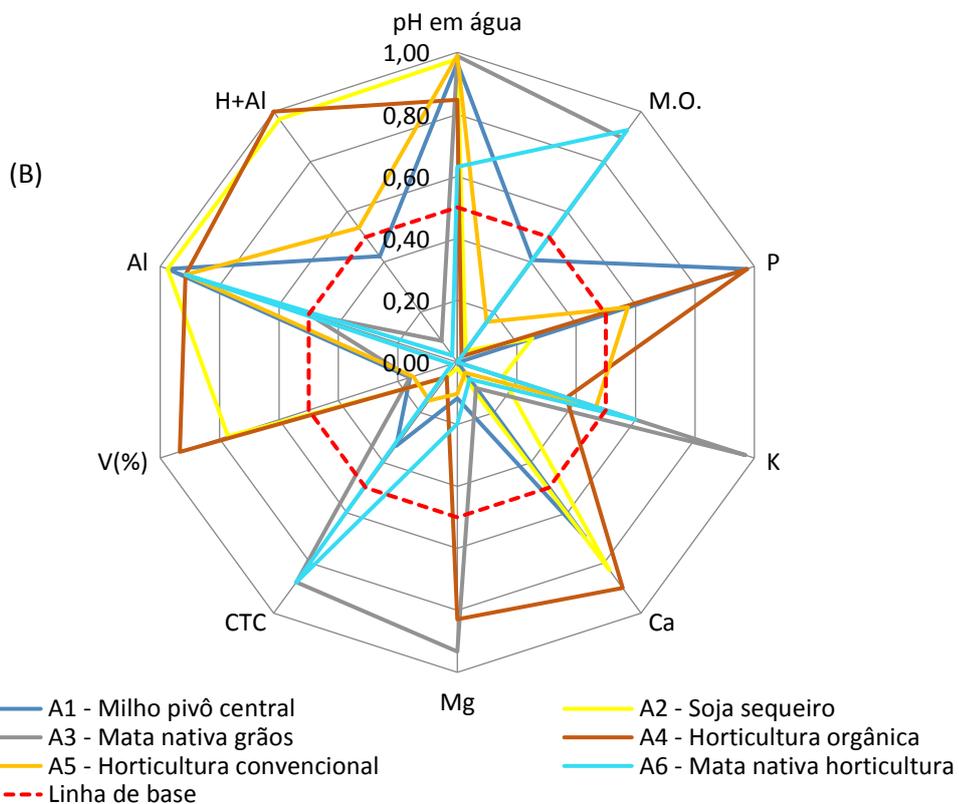
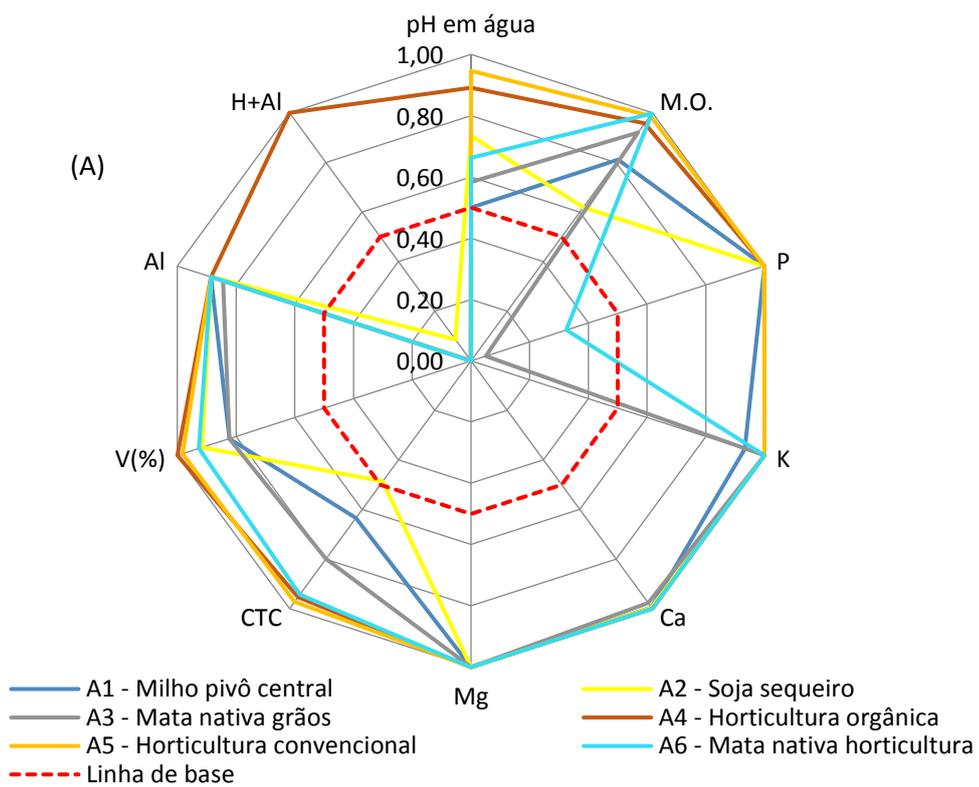


Figura 9. Comparação entre os indicadores químicos do solo em relação à linha de base pelo método de tabelas de parâmetros (A) e método matemático (B).

A acidez potencial pelo método de tabelas padronizadas obteve escore superior à linha de base somente na área de horticultura orgânica, enquanto pelo método matemático somente as áreas de vegetação nativa e milho irrigado não atingiram o escore da linha de base, esta última ficando bem próxima de atingi-la. Para o alumínio trocável todos os escores ficaram acima da linha de base, considerando a variabilidade mínima dos valores.

6.5 Índice de Qualidade do Solo

A partir dos escores calculados para cada indicador e de acordo com os pesos indicados na Tabela 7, foram obtidos os índices de qualidade dos solos das áreas estudadas, para cada função do solo e a média entre elas para o índice global, considerando que cada função tem o mesmo peso no cálculo geral.

6.5.1 IQS – Método de Tabelas Padronizadas

Os Índices de Qualidade dos Solos obtidos pelo método de tabelas de parâmetros, média geral e índices para cada função do solo, constam da Tabela 20. Todos os índices foram superiores a 50, indicando que, na média ponderada, as funções do solo estão preservadas. Por este método pode-se constatar uma variação máxima de 65%, na função “armazenar, suprir e ciclar nutrientes”, entre o maior índice alcançado de 85,3 para o solo da área de vegetação nativa adjacente à horticultura e o menor índice de 51,7 para a área de soja sequeiro.

Tabela 20. Índices de qualidade dos solos (IQS) por função e geral – Método Tabelas Padronizadas.

Função	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Receber, armazenar e suprir água (25%)	78,1	64,9	91,2	94,6	97,5	99,5
Promover o crescimento das raízes (25%)	65,3	67,8	69,0	96,2	88,1	71,7
Armazenar, suprir e ciclar nutrientes (25%)	57,5	51,7	77,3	63,6	61,8	85,3
Promover a atividade biológica (25%)	62,1	63,5	73,0	72,3	71,8	81,0
IQS Geral	65,8	62,0	77,6	81,7	79,8	84,4

A1 - Milho pivô central; A2 - Soja sequeiro; A3 - Mata nativa grãos; A4 - Horticultura orgânica; A5 - Horticultura convencional; A6 - Mata nativa horticultura.

No IQS geral, o maior índice foi de 84,4 para a área de vegetação nativa próxima às áreas de horticultura e de 62,0 para a área de soja sequeiro, com uma variação de 36%. Estas áreas apresentam os extremos de matéria orgânica conforme resultados das análises constantes da Tabela 13, sendo a área de soja sequeiro com menor valor de 3,4 dag kg⁻¹ e a área de mata nativa adjacente à horticultura com 7,7 dag kg⁻¹. A Figura 10 mostra as variações nos IQS em relação às quatro funções do solo e ao IQS médio ou geral.

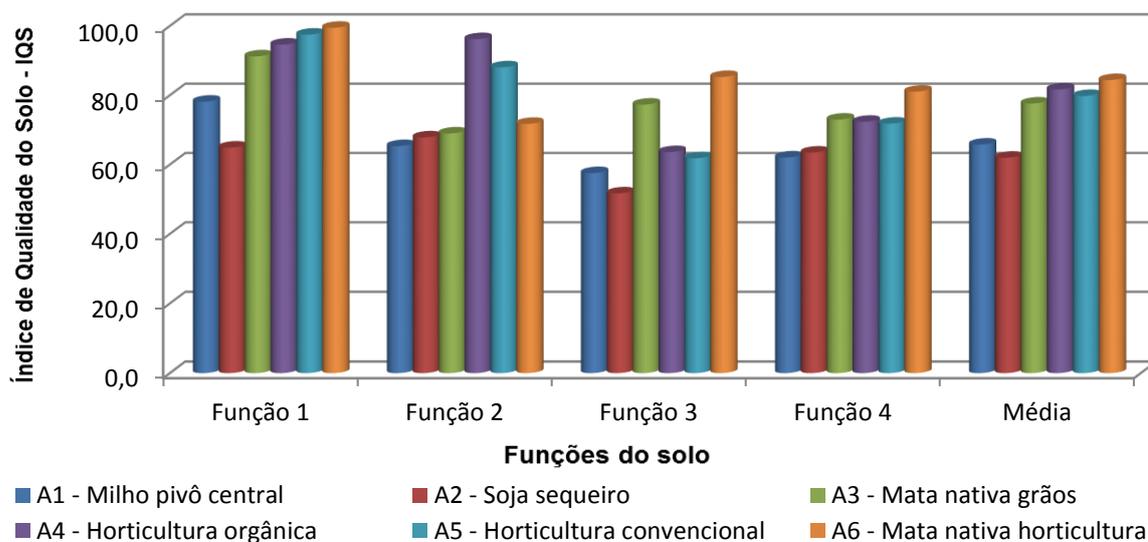


Figura 10. Índices de qualidade do solo obtidos pelo método de tabelas de parâmetros, média geral e de acordo com cada função do solo: receber, armazenar e suprir água (Função 1); promover o crescimento das raízes (Função 2); armazenar, suprir e ciclar nutrientes (Função 3) e promover a atividade biológica (Função 4).

Considerando que a matéria orgânica é o indicador de maior importância para o índice, com maior peso no total e tendo influência direta em outros indicadores como, por exemplo, a CTC, a correspondência existente entre o teor de matéria orgânica e o IQS é justificável. Na área de horticultura orgânica, apesar de um teor de matéria orgânica menor, obteve um melhor valor de IQS que a área de horticultura convencional, uma vez que os seus teores de matéria orgânica estão bem próximos e outros indicadores como acidez potencial, saturação de bases e atividade enzimática da arilsulfatase foram mais favoráveis à área de horticultura orgânica.

Doran e Parkin (1994) e Gregorich et al. (1994) consideram a matéria orgânica o indicador mais importante para a qualidade do solo, pois é fonte de nutrientes e influencia na infiltração, retenção e susceptibilidade à erosão. Segundo Conceição et al. (2005), a matéria orgânica também tem atuação na ciclagem de nutrientes, degradação de elementos tóxicos e na estruturação do solo

Sousa e Lobato (2004) consideram o teor de matéria orgânica como adequado para solo argiloso a partir de $18,0 \text{ g kg}^{-1}$ de carbono orgânico, valor bem próximo do nível adequado maior de $18,2 \text{ g kg}^{-1}$ considerado por Lopes et al. (2013) quando gerou a tabela de classes interpretativas para indicadores microbianos em Latossolo Vermelho argiloso. Para o cálculo do escore do indicador matéria orgânica, ocorreu uma adaptação para o solo muito argiloso da área de vegetação nativa adjacente à horticultura de acordo com Sousa e Lobato (2004), que considera como adequado para este tipo de textura do solo o carbono orgânico a partir do valor

igual a 19,7 g kg⁻¹. Porém, o mesmo não foi feito para a tabela de indicadores biológicos, pois foi considerado como adequado o valor de carbono orgânico de 18,2 g kg⁻¹ para todos os solos, pois a tabela só se refere à textura argilosa, podendo ter contribuído para uma super estimativa do IQS dessa área específica.

6.5.2 IQS – Método Matemático por Grupos.

Os Índices de Qualidade dos Solos obtidos pelo método matemático, média geral e índices para cada função do solo, constam da Tabela 21.

Tabela 21. Índices de qualidade dos solos (IQS) – Modelo Matemático por Grupos.

Função	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Receber, armazenar e suprir água (25%)	35,9	13,5	89,7	4,2	16,9	93,0
Promover o crescimento das raízes (25%)	47,5	44,9	69,2	57,6	46,5	53,0
Armazenar, suprir e ciclar nutrientes (25%)	23,5	19,8	71,1	11,3	15,9	82,5
Promover a atividade biológica (25%)	43,9	32,8	76,1	30,0	35,5	75,3
IQS Geral	37,7	27,7	76,5	25,8	28,7	75,9

A1 - Milho pivô central; A2 - Soja sequeiro; A3 - Mata nativa grãos; A4 - Horticultura orgânica; A5 - Horticultura convencional; A6 - Mata nativa horticultura.

Por meio desta metodologia ocorreu grande discrepância em cada grupo entre o maior índice geral alcançado, áreas de vegetação nativa do grupo 1 (76,5) e grupo 2 (75,9), e as áreas de cultivo de soja sequeiro (27,7) e hortaliça orgânica (25,8), representando variações de 176% e 194%, respectivamente. A maior variação se deu na função “promover o crescimento das raízes”, onde a variação entre estas áreas foi de 564% e 2.114%, respectivamente para estas áreas. Com valores muito altos ou baixos dos indicadores, os escores tendem aos extremos, independentemente do nível adequado daquele indicador para a qualidade do solo, o que pode ser observado na Figura 11.

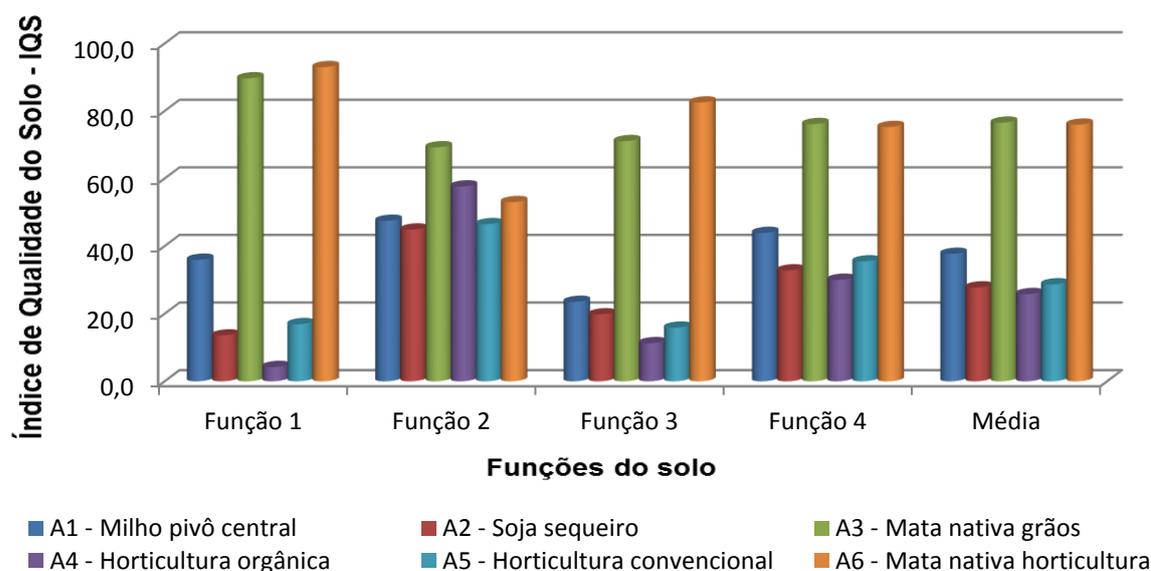


Figura 11. Índices de qualidade do solo obtidos pelo método matemático, média geral e de acordo com cada função do solo: receber, armazenar e suprir água (Função 1); promover o crescimento das raízes (Função 2); armazenar, suprir e ciclar nutrientes (Função 3) e promover a atividade biológica (Função 4).

Com exceção das áreas de horticultura convencional e orgânica na função 2, as áreas apresentam uma correspondência dos escores alcançados com os teores de matéria orgânica também pelo método matemático, sendo que para estas áreas indicadores de fertilidade de solo e resistência à penetração contribuíram para que o IQS da área horticultura orgânica fosse ligeiramente superior do que na área com horticultura convencional, apesar desta possuir um teor de matéria orgânica maior conforme Tabela 13.

Diferentemente do método por tabelas, o método matemático apresentou IQS superior a 50 somente nas áreas de vegetação nativa em todas as funções e também para a horticultura orgânica na função “promover o crescimento das raízes”. Essa discrepância se deve, principalmente, ao alto valor do teor de matéria orgânica nas áreas de vegetação nativa em relação aos respectivos grupos. A vegetação nativa adjacente aos grãos obteve um escore do indicador matéria orgânica 1.888% superior em relação à área de cultivo de soja sequeiro, enquanto a vegetação nativa adjacente à horticultura obteve um escore deste indicador 3.758% superior ao escore da área com horticultura orgânica. Pelo método de tabelas estas diferenças foram de 48 e 4% respectivamente.

6.5.3 IQS – Método Misto

Os Índices de Qualidade dos Solos obtidos pelo método misto, média geral e índices para cada função do solo, constam da Tabela 22.

Tabela 22. Índices de qualidade dos solos (IQS) – Método Misto.

Função	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Receber, armazenar e suprir água (25%)	78,1	64,9	91,2	94,6	97,5	99,5
Promover o crescimento das raízes (25%)	65,3	67,8	69,0	96,2	88,1	71,7
Armazenar, suprir e ciclar nutrientes (25%)	43,0	39,5	77,0	44,9	53,9	94,0
Promover a atividade biológica (25%)	51,3	54,4	72,7	58,5	65,9	87,5
IQS Geral	59,4	56,7	77,5	73,6	76,3	88,2

A1 - Milho pivô central; A2 - Soja sequeiro; A3 - Mata nativa grãos; A4 - Horticultura orgânica; A5 - Horticultura convencional; A6 - Mata nativa horticultura.

Neste método misto, áreas de vegetação nativa do grupo 1 e 2 apresentaram variações máximas na função “armazenar, suprir e ciclar nutrientes”, onde a variação entre estas áreas foi de 95% e 109% para estas áreas de soja em cultivo de sequeiro e horticultura orgânica respectivamente. Essa variação foi bem menor em relação ao método matemático, considerando que a variação dos escores do indicador matéria orgânica foi o mesmo que o do método de tabelas, de 48% e 4% respectivamente.

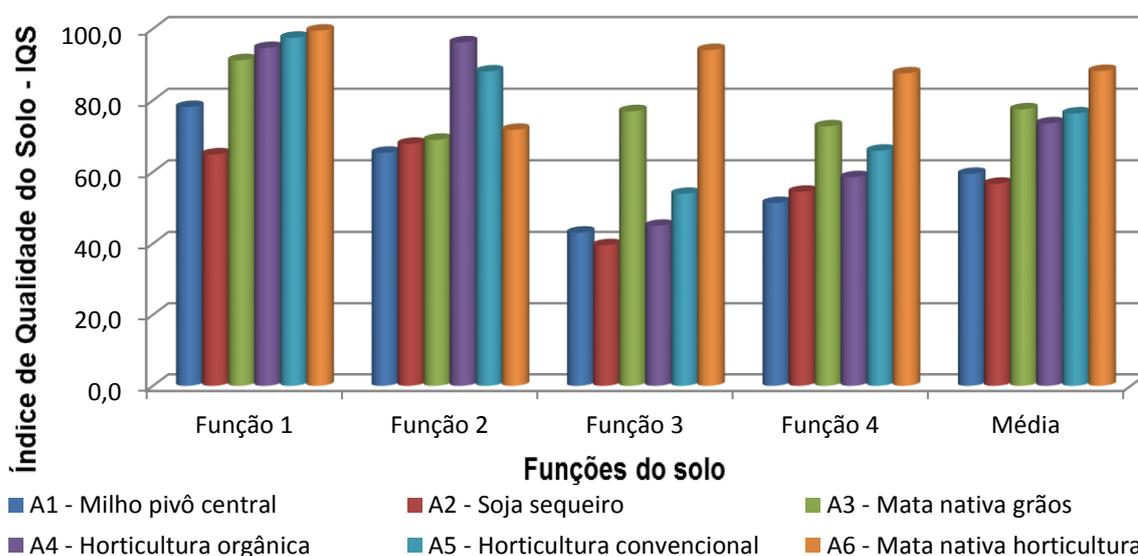


Figura 12. Índices de qualidade do solo obtidos pelo método misto, média geral e de acordo com cada função do solo: receber, armazenar e suprir água (Função 1); promover o crescimento das raízes (Função 2); armazenar, suprir e ciclar nutrientes (Função 3) e promover a atividade biológica (Função 4).

Por meio desta metodologia, onde somente os escores dos indicadores biológicos são calculados pelo método matemático, como é comumente encontrado na literatura, as funções “receber, armazenar e suprir água” e “promover o crescimento das raízes” não sofreram mudanças no cálculo do IQS. A média geral e as funções “armazenar, suprir e ciclar nutrientes” e “promover a atividade biológica” obtiveram IQS maiores do que pelo método matemático e

menores do que o método por tabelas, com exceção da área de vegetação nativa adjacente à horticultura, que obteve os maiores escores dos indicadores biológicos e IQS. Para esta função, enquanto todas as áreas obtiveram IQS superior a 50 pelo método de tabelas, pelo método misto somente as áreas com vegetação nativa e a de horticultura convencional obtiveram IQS superior a este limite.

6.6. Avaliação e perspectiva

A análise dos indicadores físicos, químicos e biológicos possibilitou detectar problemas de manejo, como, por exemplo, o baixo carbono da biomassa microbiana nas áreas de horticultura pelo revolvimento do solo e falta de cobertura morta e o baixo fornecimento de palhada nas áreas de plantio direto, indicado pela baixa atividade da enzima beta-glicosidase.

Porém, a análise da qualidade dos solos somente pela verificação de dados agregados desses indicadores em um índice de qualidade do solo, apesar de possibilitar a comparação de qualidade entre diferentes solos, pode mascarar a observação de problemas de manejo que porventura estejam ocorrendo, como ocorreu com o método de tabelas padronizadas, com todos os solos estudados obtiveram valores acima do desejável, mas com problemas de manejo identificado pelos escores individuais.

Dentre os métodos utilizados, o método matemático apresentou muitas distorções no cálculo do IQS e dos escores, uma vez que havendo extremos nos valores de indicadores, principalmente com um indicador de peso como a matéria orgânica, os resultados ficam prejudicados pelo valor calculado excessivamente alto da linha de base. Para o método misto estas distorções foram reduzidas, considerando que o método matemático só foi utilizados para o cálculo dos escores dos indicadores biológicos.

Diferentemente do método matemático, o método de tabelas de parâmetros foi eficaz para a determinação da qualidade dos solos, possibilitando comparar a variação de indicadores com as condições de manejo. Os escores dos indicadores biológicos que, de acordo com a literatura, são na sua maioria realizados pelo método matemático na determinação da qualidade do solo em comparação com a vegetação nativa, apresentaram acentuadas divergências entre os dois métodos. Apesar do método de tabelas ser mais eficiente para o cálculo dos escores dos indicadores biológicos, são necessários novos estudos para elaboração de parâmetros destes indicadores para solos com texturas diferentes, considerando que o teor adequado de carbono orgânico no solo varia com a textura.

7. CONCLUSÕES

Os índices de qualidade dos solos, interpretados em conjunto com os escores individuais dos indicadores, possibilita identificação precoce e mitigação dos problemas causados pelo manejo.

Os indicadores físicos, químicos e biológicos foram eficazes na identificação das variações e problemas de manejo nas áreas estudadas.

O método de tabelas de parâmetros foi mais eficaz que o método misto e este mais eficaz que o matemático para a determinação da qualidade dos solos, possibilitando comparar a variação de indicadores com as condições de manejo sem distorções.

As áreas de vegetação nativa, com maiores teores de matéria orgânica, apresentaram os maiores IQS, enquanto as áreas de soja em cultivo de sequeiro e horticultura, foram as que apresentaram menores IQS e teores de matéria orgânica, uma vez que este indicador possui o maior peso, contribuindo com 37,5% no escore final.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual Operativo do Programa “Produtor de Água”**. Brasília, 74 p., 2012.

Disponível em: http://produtordeagua.ana.gov.br/Portals/0/DocsDNN6/documentos/Manual%20Operativo%20Vers%C3%A3o%202012%20%2001_10_12.pdf,
Acessado em 05/02/2018.

ALEXANDRATOS, N. et al. **World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision**. ESA Working Paper No. 12-03. Rome, FAO, 2012.

ALMEIDA JÚNIOR, L. R.. **Caracterização Pedológica Do Ribeirão Estanislau, DF**: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, Brasília, 2015, 51p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação).

ALVES, J. A. L. **Relações internacionais e temas sociais: a década das conferências**. Brasília: Instituto Brasileiro de Relações Internacionais (IBRI), 2001.

ANDRADE, R.S.; STONE, L.F. **Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. [online]. vol.13, n.4 [cited 2019-02-02], pp.382-388, 2009. Available from: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662009000400003 &lng=en&nrm=iso>. ISSN 1415-4366. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662009000400003>.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J. e LACERDA, M. P. C. **Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob Cerrado nativo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 31:1099-1108, 2007.

BALOTA, E. L.; NOGUEIRA, M. A.; MENDES, I. C.; HUNGRIA, M.; FAGOTTI, D. S. L.; MELO, G. M. P.; SOUZA, R. C.; MELO, W. J. de. **Enzimas e seu papel na qualidade do solo**. In: ARAÚJO, A. P.; ALVES, B. J. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

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

BONZI, R. S. **Meio século de Primavera silenciosa: um livro que mudou o mundo**. Editora UFPR, Desenvolvimento e Meio Ambiente, n. 28, p. 207-215, jul./dez, 2013.

BOPAIAH, B.M. e SHETTI, H.S. **Soil microflora and biological activities in the rhizospheres and root regions of coconut-based multistoreyed cropping and coconut monocropping systems**. Soil Biol. Biochem., 17:297-302, 1991.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei PL 792/2007. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais e dá outras providências**. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=348783>>. Acesso em: 03/02/2018. Texto Original.

BURSZTYN, M.; BURSZTYN, M. A. **Fundamentos de política e gestão ambiental – Caminhos para a sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Garamond. 604 p., 2013.

BURSZTYN, M.; BURSZTYN, M. A. **Fundamentos de política e gestão ambiental : os caminhos do desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond. 612 p., 2012.

CARNEIRO, R. G.; MENDES, I. de C.; LOVATO, P. E.; CARVALHO, A. M. **Indicadores biológicos associados ao ciclo do fósforo em solos de Cerrado sob plantio direto e plantio convencional**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, DF, v. 39, n. 7, p. 661-669, 2004.

CHAER, G.M.; TÓTOLA, M.R. **Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma de plantios de eucalipto sobre indicadores de qualidade do solo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.31, p.1381- 1396, 2007.

CHAER, G.M. **Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos**. (Dissertação de Mestrado) Viçosa/Departamento de Microbiologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 100p. 2001.

CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E.; **Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.29, p.777 - 788, 2005.

DORAN, J.W.; PARKIN. T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A., ed. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Soil Science Society of America, p.107-124, 1994.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. 353p. Brasília, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, **Manual de métodos de análise de solos** / organizadores, Guilherme Kangussú Donagema... [et al.]. — Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 230 p. - (Documentos / Embrapa Solos, ISSN 1517-2627; 132), 2011.

FAO. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW)** – Managing systems at risk. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London. 2011.

FAO. **Status of the World's Soil Resources**. Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy. 2015.

FERREIRA, J. M. L. et al. **Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas**. Informe Agropecuário, v. 33, n. 271, p. 12–25, 2012.
Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/81585/1/Indicadores-sustentabilidade.pdf>, Acessado em 05/02/2018.

GAVARD, F. M.P. **Do impasse ao consenso: um breve histórico do conceito de desenvolvimento sustentável**. Revista Sociais e Humanas, Santa Maria, v. 22, n. 2, 2009.
Disponível em: < <http://periodicos.ufsm.br/sociaisehumanas/article/view/1175> >. Acesso em: 20 de mar. 2019.

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

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, 367-375, 1994.

GUIMARÃES, R.; FONTOURA, Y. **Desenvolvimento sustentável na Rio+20: discursos, avanços, retrocessos e novas perspectivas.** Cad. EBAPE.BR, Rio de Janeiro, v. 10, n. 3, p. 508-532, Sept. 2012.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. **Applications of the resistance curve in the control of the physical quality of soils under grass.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.35, p.1493-1500, 2000.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JÚNIOR, M.S. e TORMENA, C.A. **Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 25:11-18, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável: Brasil 2015.** Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv94254.pdf>>. Acesso em: 02 fevereiro 2018.

KARLEN, D. L. et al. **Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation.** Soil Science Society American Journal, Madison, v. 61, p. 4–10, 1997.

KARLEN, D.L. e 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. Soil Sci. Soc. Am. Spec. Pub., 35:53-72, 1994.

KER, J.C. **Latossolos do Brasil: uma revisão.** Geonomos, 5:17-40, 1998.

LAYRARGUES, Philippe Pomier. **Do ecodesenvolvimento ao desenvolvimento sustentável: evolução de um conceito?** Proposta, Rio de Janeiro, v. 24, n. 71, p. 1-5, fev. 1997.

LOPES, A. A. DE C.; SOUSA, D. M. G. DE; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. DOS; GOEDERT, W. J.; MENDES, I. DE C. **Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon.** Soil Science Society of America Journal, v.77, p.461-472, 2013.

LOPES, A. E. et al. **Do ecodesenvolvimento ao desenvolvimento sustentável: a trajetória de conflitos e desafios para o meio ambiente.** ForScience: revista científica do IFMG, Formiga, v. 5, n. 2, e00314, out. Edição especial, 2017.

LOPES, A. S. **Manual internacional de fertilidade do solo.** Tradução e adaptação. 2ª edição. Piracicaba. Potafos, 177 p., 1998.

MACHADO VEZZANI, F.; MIELNICZUK, J. **Uma visão sobre qualidade do solo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33.4, 2009.

MAIA, C. M. B. de F. et al. **Soil Organic Matter: Chemical and Physical Characteristics and Analytical Methods. A Review.** Current Organic Chemistry, Hilversum, v. 17, p. 2985–2990, 2013.

MATIAS, E.D. et al. **Sensitivity of different soil quality indicators to assess sustainable land management: Influence of site features and seasonality.** Soil and Tillage Research, 159, 9-22, 2016.

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.

MEADOWS, D; RANDERS, J; MEADOWS, D. **Limites do crescimento: a atualização de 30 anos.** Rio de Janeiro: Qualitymark, 2007.

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;

MENDES, I.C.; SOUZA, L.V.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. **Propriedades biológicas em agregados de um Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio convencional e direto no Cerrado.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.27, p.435-443, 2003.

MENDES, I.C.; REIS JR, F.B.; **Uso de Parâmetros Microbiológicos como indicadores para Avaliar a Qualidade do Solo e a Sustentabilidade de Agroecossistemas.** Planaltina – DF. Embrapa Cerrados, (Documentos/Embrapa Cerrados), 34p. 2004.

MENDES, F. G.; MELLONI, E. G. P. e MELLONI, R. **Aplicação de atributos físicos do solo no estudo da qualidade de áreas impactadas, em Itajubá – MG.** Cerne, 12:211-220, 2006.

MENDES, I. C.; SILVA, L. G. da.; REIS JUNIOR, F. B.; TÓTOLA, M. R. **Cálculo de um índice de qualidade de solo para diferentes agroecossistemas do Cerrado.** In: Simpósio Nacional sobre o Cerrado, IX; Simpósio Internacional sobre Savanas Tropicais, II, 2008, Brasília. Anais... Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: global assessment reports.** Washington, DC: Island Press, 2005.

MOREIRA, L.; ASSAD, E.D. **Quantificação do uso e adequação das terras na microbacia do Córrego Lamarão, DF.** Planaltina: Embrapa Cerrados, 2000.

NASCIMENTO, E. P. **Trajatória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico. Estudos Avançados,** São Paulo, v. 26, n. 74, p. 51-64, jan. 2012. ISSN 1806-9592. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10624>>. Acesso em: 01 mar. 2018. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142012000100005>.

NEUMANN, M. R. B. **Mapeamento Digital de Solos, no Distrito Federal.** Brasília: Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Tese de Doutorado, 110p, 2012.

OLIVEIRA, J. R. A.; MENDES, I. C.; VIVALDI, L. **Biomassa microbiana de carbono em solos de Cerrado sob vegetação nativa e sob cultivo: avaliação dos métodos fumigação-incubação e fumigação-extração.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 25, p. 863-871, 2001.

PAGLIARIN, A. C; TOLENTINO, Z. T. **Desenvolvimento sustentável na perspectiva do princípio da responsabilidade em Hans Jonas.** Meritum, Belo Horizonte, v.10, n.1, p. 11-33, jan./jun., 2015.

Disponível em:<<http://www.fumec.br/revistas/meritum/article/viewFile/3367/1812> >. Acesso em: 15 mar. 2019.

PAIXÃO, A.C.N.O. **Avaliação da política florestal no Distrito Federal, em referência à cobertura florestal nas propriedades rurais.** (Dissertação de Mestrado) Curitiba/Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 103p. 2000.

PANETTIERI, M. et al. **Soil organic matter degradation in an agricultural chronosequence under different tillage regimes evaluated by organic matter pools, enzymatic activities and CPMAS ¹³C NMR.** Soil Biology and Biochemistry 78:170-181, 2014.

PARRON, L.M. et al. **Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica.** Revista Brasileira de Ciências Agrárias 8: 316-323, 2015.

PORTILHO, I. I. R., et al. **Persistência de inseticidas e parâmetros microbiológicos em solo sob sistemas de manejo.** Embrapa Agropecuária Oeste-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2015.

PRADO, Rachel Bardy et al. **Current overview and potential applications of the soil ecosystem services approach in Brazil.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1021-1038, Sept. 2016.

RAIJ, B.van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. e QUAGGIO, J.A. **Determinação da Matéria Orgânica.** In: RAIJ, B.van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. e QUAGGIO, J.A., eds. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. p.189-199.

REATTO, A.et al. **Mapa Pedológico Digital e SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo.** Embrapa Cerrados, Planaltina, p. 31, 2004.

REATTO, A.; CORREIA, J.R.; SPERA, S.T.; CHAGAS, E. DE S.; ANDAHUR. J.P.; GODOY, M.J.S.; ASSAD, M.L.C.L. **Levantamento semidetalhado dos solos da bacia do Rio Jardim – DF, escala 1:50.000.** Planaltina: Embrapa Cerrados, 63 p. (Embrapa cerrados. Boletim de Pesquisa, 18), 2000.

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., (Ed.). Methods for assessing soil quality Madison: Soil Science Society of America, p.203-216. (Special Publication, 49), 1996.

RODRIGUES, G.S.; CAMPANHOLA, C. **Sistema integrado de avaliação de impacto ambiental aplicado às atividades do novo rural**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.38, n.4, p.445-451, abr. 2003.

ROMEIRO, A. R. **Perspectivas para políticas agroambientais**. In: RAMOS, P. Dimensões do agronegócio brasileiro: políticas, instituições e perspectivas. Brasília: MDA, 2007. p. 283-312.

SANDS, G.R. e PODMORE, T.H. **A generalized environmental sustainability index for agricultural systems**. Agriculture Ecosystems & Environment, 79:29-41, 2000.

SANTANA, D.P. e BAHIA FILHO, A.C. **Qualidade do solo: Uma visão holística**. B. Inf. SBCS, 27:15-18, 2002.

SOUSA, D.M.G. e LOBATO, E., eds. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. Planaltina, Embrapa Cerrados, 416 p., 2004.

SOUSA-SILVA, J.C.; (Ed.). **Cerrado: caracterização e recuperação de Matas de Galeria**. Planaltina: Embrapa-CPAC, p. 664-687, 2001.

STEFANOSKI, D. C. et al. **Selecting soil quality indicators for different soil management systems in the Brazilian Cerrado**. Pesquisa Agropecuária Brasileira 51.9: 1643-1651, 2016.

STEFANOSKI, D. C. et al. **Densidade, resistência à penetração e porosidade sob sistemas de manejo em Latossolo do Cerrado piauiense**. Pesquisa Agropecuária Brasileira 51.9: 1643-1651, 2013.

STOLF, R. **Fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em força/unidade de área**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19, Piracicaba. Anais v.2, p.823-836, 1990.

TABATABAI, M. A. **Soil enzymes**. In: R. W. Weaver et al. (ed.). **Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties**. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison. p. 778-833, 1994.

TOMAZI, M. **Estabilidade da matéria orgânica em Latossolos do Cerrado sob sistemas de uso e manejo**. 120 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008..

MENDONÇA, E.S. e MATOS, E.S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Universidade Federal de Viçosa: UFV, 2005.

VANCE, E.D.; BROOKES, P.C.; JENKINSON, D.S. **As extraction method for measuring soil microbial biomass C**. **Soil Biology and Biochemistry**, 19(6), 703-707, 1987.

VEZZANI, F.M. e MIELNICZUK, J. **Uma visão sobre qualidade do solo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33:743-755, 2009.

VIEIRA, S. **Bioestatística: tópicos avançados**. 3. ed. rev. São Paulo: Campus, 2010.

WYMORE, A.W. **Model-Based Systems Engineering. An Introduction to the Mathematical Theory of Discrete Systems and to the Tricotyledon Theory of System Design.** CRC, Boca Raton, FL, 1993.

ZINN Y.L., LAL R., BIGHAM J.M., RESCK D.V.S. **Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian Cerrado: Texture and mineralogy.** Soil Science Society of America Journal, 71, 1204-1214, 2007.

ZINN YL, LAL R, RESCK DVS, **Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil.** Soil & Tillage Research, 84, 28-40, 2005.

ANEXO 1 – Saídas do sistema R para os testes Kruskal-Wallis e Dunn dos indicadores físicos de solo e de carbono da biomassa microbiana.

1) Resistência à penetração (0 a 10 cm)

Kruskal-Wallis chi-squared = 50.927, df = 5, p-value = 8.954e-10

Dunn.test

Comparison of x by group (No adjustment)

Col Mean- Row Mean	A1	A2	A3	A4	A5
A2	1.582129 0.0568				
A3	2.269536 0.0116*	0.687407 0.2459			
A4	6.270323 0.0000*	4.688194 0.0000*	4.000786 0.0000*		
A5	4.182640 0.0000*	2.600511 0.0047*	1.913103 0.0279	-2.087682 0.0184*	
A6	1.342081 0.0898	-0.240047 0.4051	-0.927454 0.1768	-4.928241 0.0000*	-2.840558 0.0023*

alpha = 0.05 - Reject Ho if p <= alpha/2

2) Resistência à penetração (10 a 20 cm)

Kruskal-Wallis chi-squared = 59.5, df = 5, p-value = 1.542e-11

Dunn.test

Comparison of x by group (No adjustment)

Col Mean- Row Mean	A1	A2	A3	A4	A5
A2	-1.248756 0.1059				
A3	1.812481 0.0350	3.061238 0.0011*			
A4	4.877287 0.0000*	6.126044 0.0000*	3.064805 0.0011*		
A5	3.581693 0.0002*	4.850431 0.0000*	1.740210 0.0409	-1.373635 0.0848	
A6	-0.581966 0.2803	0.645071 0.2594	-2.362923 0.0091*	-5.374424 0.0000*	-4.108392 0.0000*

alpha = 0.05 - Reject Ho if p <= alpha/2

3) Densidade do solo

Kruskal-Wallis chi-squared = 19.844, df = 5, p-value = 0.001337

Dunn.test

Comparison of x by group (No adjustment)

Col Mean- Row Mean	A1	A2	A3	A4	A5
A2	0.969868 0.1661				
A3	2.083421 0.0186*	1.113552 0.1327			
A4	2.370789 0.0089*	1.400921 0.0806*	0.287368 0.3869		
A5	2.694079 0.0035*	1.724210 0.0423	0.610658 0.2707	0.323289 0.3732	
A6	4.059079 0.0000*	3.089211 0.0010*	1.975658 0.0241*	1.688289 0.0457	1.365000 0.0861

alpha = 0.05 - Reject Ho if p <= alpha/2

4) Carbono da biomassa microbiana

Kruskal-Wallis chi-squared = 22.668, df = 5, p-value = 0.0003907 (significativo)

Dunn.test

Comparison of x by group (No adjustment)

Col Mean- Row Mean	A1	A2	A3	A4	A5
A2	0.797368 0.2126				
A3	-1.087320 0.1384	-1.999014 0.0228*			
A4	1.522248 0.0640	0.768851 0.2210	2.767866 0.0028*		
A5	1.504304 0.0663	0.788307 0.2153	2.672996 0.0038*	0.063427 0.4747	
A6	-1.993421 0.0231*	-2.960079 0.0015*	-0.961064 0.1683	-3.728930 0.0001*	-3.579096 0.0002*

alpha = 0.05 - Reject Ho if p <= alpha/2