



WHARLEY PEREIRA DOS SANTOS

**INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM
RELAÇÃO À EROÇÃO HÍDRICA EM
SISTEMAS AGRÍCOLAS UTILIZANDO A
LÓGICA FUZZY**

LAVRAS – MG

2016

WHARLEY PEREIRA DOS SANTOS

**INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM RELAÇÃO À
EROSÃO HÍDRICA EM SISTEMAS AGRÍCOLAS UTILIZANDO A
LÓGICA FUZZY**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Prof. Dr. Marx Leandro Naves Silva

Coorientador

Prof. Dr. Diego Antônio França de Freitas

LAVRAS – MG

2016

Ficha Catalográfica

Santos, Wharley Pereira dos.

Indicadores de qualidade do solo em relação à erosão hídrica em sistemas agrícolas utilizando a lógica Fuzzy / Wharley Pereira dos Santos. – Lavras : UFLA, 2016.

54 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de Lavras, 2106.

Orientador(a): Marx Leandro Naves Silva.

Bibliografia.

1. Qualidade do solo. 2. Erosão hídrica. 3. Atributos do solo. 4. Plantas de cobertura. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

WHARLEY PEREIRA DOS SANTOS

**INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM RELAÇÃO À
EROSÃO HÍDRICA EM SISTEMAS AGRÍCOLAS UTILIZANDO A
LÓGICA FUZZY**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 02 de setembro de 2016.

Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro - UFLA

Dr. Marcelo Angelo Cirillo - UFLA

Dr. Elifas Nunes de Alcântara - EPAMIG

Prof. Dr. Marx Leandro Naves Silva

Orientador

LAVRAS – MG

2016

A Deus, minha família e mestres,

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade.

À FAPEMIG, pela concessão da bolsa de mestrado. À CAPES e ao CNPq.

Ao conjunto de professores de diferentes áreas, pelo afeto e dedicação.

Ao professor Marx, pela orientação, paciência e disposição para ajudar.

A todos funcionários do DCS/UFLA, em especial à Dulce, Doroteo, Dirce e Maria Alice.

A todos os colegas de departamento.

Aos meus pais, Adão e Maria pelo amor e apoio de sempre, em todas as minhas decisões nas diferentes etapas da minha vida e aos meus irmãos Wellington e Welma e às minhas sobrinhas.

A aqueles que me proporcionaram companheirismo, amor e apoio em todos os momentos difíceis da minha vida.

MUITO OBRIGADO!

"Não sou obrigado a vencer, mas tenho o dever de ser verdadeiro. Não sou obrigado a ter sucesso, mas tenho o dever de corresponder à luz que tenho."
(Abraham Lincoln)

RESUMO

A quantificação da qualidade do solo em diferentes sistemas agrícolas é essencial para se averiguar o seu estado atual de conservação. Para isso, é necessária a utilização de diferentes indicadores da qualidade do solo através de conjuntos de atributos físicos e químicos. Objetiva-se com esse estudo a determinação de diferentes modelos de indexação da qualidade do solo para diferentes plantas de cobertura cultivadas em sistemas de manejos diversos no controle das perdas de solo e água pela erosão hídrica. O experimento foi conduzido em ciclos anuais de cultivo entre 2007 e 2014 no campus da Universidade Federal de Lavras, município de Lavras – MG. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, a partir do qual foram avaliadas as diferentes espécies de plantas de cobertura, distribuídas em diferentes sistemas de cultivo solteiro e em consórcio com milho. Avaliou-se dois modelos de indexação da qualidade do solo, a saber: Índice de qualidade integrado aditivo e o Índice de qualidade Nemoro. Os dois modelos apresentaram excelente correlação, porém o Nemoro obteve valores baixos em relação ao modelo integrado aditivo. Atributos físicos e químicos foram selecionados para composição de um conjunto menor de indicadores de qualidade do solo.

Palavras-chave: Qualidade do solo. Erosão hídrica. Atributos do solo. Plantas de cobertura.

ABSTRACT

Quantification of soil quality in different agricultural systems is essential to ascertain its current condition. For this, the use of different indicators of quality of the soil through sets of physical and chemical properties is required. Objective with this study the determination of different models of indexation of soil quality for different cover crops grown in many managements systems in the control of soil and water losses by water erosion. The experiment was conducted in annual cycles of cultivation between 2007 and 2014 on the campus of the Federal University of Lavras, Lavras - MG. The soil was classified as Red-Yellow Latosol, from which we evaluated the different species of cover crops, distributed in different cropping systems and in consortium with corn. It was evaluated two models index of soil quality, namely: integrated additive Quality Score and Quality Score Nemoro. Both models showed excellent correlation, but the dating obtained low values in relation to the integrated additive model. Physical and chemical attributes were selected for the composition of a smaller set of soil quality indicators.

Keywords: Soil quality. Water erosion. Soil attributes. Covering crops.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Comportamento das funções de pertinência Fuzzy para alguns indicadores selecionados.41
- Figura 2 - Índices de qualidade do solo pelo modelo de indexação Nemoro para cada ano de cultivo com espaçamentos entre linhas de plantio, plantio em nível ou desnível e consórcios nos ciclos de cultivo.43
- Figura 3 - Índices de qualidade do solo pelo modelo Integrado aditivo para cada ano de cultivo com espaçamentos entre linhas de plantio, plantio em nível ou desnível e consórcios nos ciclos de cultivo. Indicadores de qualidade do solo: V% = Porcentagem de saturação por bases, Mos = Matéria orgânica do solo, Ds = Densidade do solo, PT = Porosidade Total, Macro = Macroporosidade, DMG = Diâmetro médio geométrico.46
- Figura 4 - Perdas de água e solo durante os ciclos de cultivo anuais.48
- Figura 5 - Biplot com Escalonamento Multidimensional para os indicadores analisados, índices e perdas de água e solo.50
- Figura 6 - Relação linear entre os modelos IQN e IQI aditivo51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Uso do solo com plantas de cobertura, suas formas de manejo e simbologia utilizada.	37
Tabela 2 - Funções de pontuação padrão (Pertinência Fuzzy) para cada indicador selecionado	40

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	12
1 INTRODUÇÃO GERAL	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 Definindo qualidade do solo	15
2.2 A qualidade do solo em sistemas agrícolas.....	17
2.3 Indicadores de qualidade do solo	18
2.4 Desenvolvimento de índices de qualidade do solo.....	21
2.5 A lógica Fuzzy	22
2.5.1 Dinâmica da qualidade do solo com base na Lógica Fuzzy	24
2.5.1.1 Regras de associação fuzzy	24
REFERÊNCIAS.....	26
CAPÍTULO 2	31
ÍNDICES DE QUALIDADE DO SOLO PARA AVALIAÇÃO DO MANEJO DE PLANTAS DE COBERTURA NO CONTROLE DA EROSÃO HÍDRICA NO SUL DO ESTADO DE MINAS GERAIS	31
1 INTRODUÇÃO.....	34
2 MATERIAIS E MÉTODOS	36
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4 CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS.....	53

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

O uso do solo com sistemas que proporcionem uma cobertura vegetal que reduza os riscos de perdas de água e solo, conseqüentemente impactando na sua fertilidade, é importante para uma produção agrícola sustentável em todos os seus níveis.

Resíduos culturais na superfície do solo são importantes fontes de reserva de nutrientes para o solo. A sua disponibilização pode ser lenta e gradual ou rápida e intensa, dependendo das espécies de plantas de cobertura que podem ser utilizadas e a sua interação com os fatores climáticos e a atividade biológica do solo (MENDOÇA et al., 2015). Além disso, uma boa cobertura vegetal do solo proporciona a redução das perdas de água com diminuição do escoamento superficial e elevação da taxa de infiltração de água no solo (PANACHUKI et al., 2011).

O desenvolvimento de plantas leguminosas e gramíneas tem papel chave na melhoria e manutenção da qualidade do solo ao longo do tempo em função da sua associação conjunta em sistemas agrícolas, apresentando um grande potencial no controle dos processos erosivos (CARDOSO et al., 2012). A escolha da espécie vegetal a ser mantida no solo dá-se em virtude da sua capacidade como cobertura do solo em comparação a outras plantas de cobertura. Quando a vegetação nativa é substituída por sistemas agrícolas de cultivo anual, tem-se uma alteração no equilíbrio do ecossistema. Assim espera-se que um novo equilíbrio seja atingido com as melhores práticas de manejo a serem adotadas.

As regiões de clima tropical, montanhosas e com declives acentuados, especialmente no Brasil, são mais propensas a maior risco de erosão hídrica devido às elevadas condições de pluviosidade. A alta intensidade das chuvas

nessas regiões facilita a remoção da camada fértil do solo através da sua conversão em escoamento superficial.

Nesse caso, a degradação do solo é ocasionada principalmente pelo arraste das partículas menores, podendo essas serem mais ricas em nutrientes, o que possibilitaria o decréscimo da fertilidade natural. Com esse decréscimo, há a redução da produtividade e as demandas por corretivos e fertilizantes do solo são maiores. A espessura do solo é reduzida, na maioria dos casos, devido às perdas de solo por erosão hídrica. A capacidade de retenção e redistribuição da água no perfil é diminuída e com isso maiores escoamentos superficiais são gerados, tendo como possível consequência, um aumento cada vez maior nas taxas de erosão do solo (SANTOS et al, 2010).

A vegetação é responsável por grande parte da interceptação do volume total de chuvas precipitadas, sendo que o restante atinge a superfície do solo. Após exceder-se a velocidade de infiltração da água no solo pela intensidade de precipitação, inicia-se o escoamento superficial. Preparos do solo que mantêm a palhada na sua superfície, como o revolvimento mínimo no cultivo, são capazes de favorecer o aumento da taxa de infiltração básica da água no solo ao dissipar a energia cinética da chuva e as suas consequências sobre o solo (LEITE et al., 2009). Uma vez que a matéria orgânica é acumulada no solo, duas a três vezes o equivalente em água do seu peso retido, o que possibilita dessa forma um acréscimo considerável de infiltração de água e um decréscimo da erosão (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

As copas de plantas e a cobertura vegetal que proporciona resíduos culturais são importantes para a proteção do solo contra o impacto das gotas de chuva. A ausência de revolvimento mecânico no cultivo convencional aliada às copas das plantas promove uma melhoria das propriedades físico-hídricas do solo.

Quando observamos o solo do ponto de vista da sua qualidade para o suporte dos ecossistemas terrestres, esse é um recurso natural reutilizável para seu manejo feito de forma adequada. Embora isso seja adequável, o solo na escala antrópica pode ser considerado como um recurso não renovável. A qualidade do solo mede então a capacidade de realização de determinadas funções, refletindo a combinação de atributos do solo. Desses, alguns são considerados inerentes ao solo e, de forma relativa, não podem ser alterados. Outros atributos do solo, como estrutura e a matéria orgânica, podem ser alterados de forma significativa pelo manejo (BRADY; WEIL, 2009), apresentando um forte dinamismo no solo.

A qualidade do solo pode ser assim classificada como inerente ou dinâmica. Esse dinamismo aliado às qualidades intrínsecas é importante para a observação das mudanças estruturais que se manifestam em um curto espaço de tempo num solo em estado de conservação. Para isso é necessária uma indexação da qualidade do solo por meio da conjunção dos atributos do solo melhor avaliados como indicadores de qualidade. Parte daí uma abordagem matemática quantitativa da qualidade do solo através dos indicadores de qualidade.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade do solo e sua indexação em sistemas de manejo agrícola através de indicadores físicos e químicos do solo em relação às perdas de solo e água pela erosão hídrica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Definindo qualidade do solo

A qualidade do solo revela-se como um conceito educacional e ferramenta de avaliação da aplicação de alguma atividade antrópica no solo e pode servir para o monitoramento dessa ação. Ela produz uma maior consciência do desempenho

dos processos essenciais do solo para serem usadas na tomada de decisões de gestão (WIENHOLD et al., 2004).

Para o Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), a qualidade do solo relaciona-se com a capacidade do solo funcionar como um ecossistema vivo vital no momento atual e a preservação de suas funções para uso futuro (USDA-NRCS, 2008).

A qualidade do solo (QS) é definida como sendo “a capacidade do solo funcionar dentro do ecossistema e uso da terra dentro dos limites para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a sanidade vegetal e animal” (DORAN; PARKIN, 1996).

Uma definição para qualidade do solo foi proposta por Doran e Parkin (1994), sendo reformulada por Doran (1997), como sendo “a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou aumentar a qualidade do ar e da água, além de promover a saúde das plantas, dos animais e dos homens”. Em outras palavras, é a capacidade do solo exercer suas funções na natureza (DORAN, 1997).

Segundo Larson e Pierce (1991), dentre as funções do solo que influenciam na sua qualidade, incluem-se a capacidade de: armazenar e liberar nutrientes e outros componentes químicos, armazenar e liberar água para as plantas e águas superficiais e de recarga subterrânea, promover e sustentar o crescimento da raiz, manter o habitat biótico adequado, responder ao manejo e resistir à degradação.

A restauração da qualidade do solo após a ocorrência de processos de degradação está diretamente relacionada com o restabelecimento das funções

específicas que o solo exerce dentro do ecossistema (KIMPE; WARKENTIN, 1998).

2.2 A qualidade do solo em sistemas agrícolas

A avaliação de atributos físicos e químicos individuais do solo é um caminho para estudar o impacto do manejo do solo na sua qualidade. No entanto, esses parâmetros são geralmente interdependentes, e mais importantes, cultivos diversos e rotação podem afetar cada parâmetro de forma diferente, confundindo a avaliação geral da qualidade do solo.

Na transformação de sistemas naturais em agrícolas, muitos atributos do solo são alterados, alguns dos quais, por estarem relacionados com processos do ecossistema e serem sensíveis a variações no uso e manejo do solo, indicam alterações na sua qualidade (DORAN; PARKIN, 1996). As diversas inter-relações entre os atributos do solo controlam processos e aspectos relacionados à variação no tempo e no espaço. Dessa forma, qualquer alteração no solo pode alterar diretamente a matéria orgânica, estrutura, bem como a fertilidade, tendo reflexos nos agroecossistemas (BROOKES, 1995).

A qualidade é inerente a cada tipo de solo, porém este conceito possui partes distintas e interconectas. Sendo assim, segundo Gregorich e Carter (1997), a qualidade pode estar ligada à capacidade inerente do solo e à parte dinâmica desse, influenciada pelo seu uso e manejo. Suas características intrínsecas como profundidade efetiva, mineralogia e textura, assim como os atributos que variam no tempo, levam a uma dependência para com a qualidade física. Áreas diferentes podem ser comparadas através da profundidade efetiva, mineralogia e textura. Por outro lado, a quantificação de propriedades dinâmicas é importante para a percepção dos efeitos de sistemas de manejo do solo ao longo do tempo.

As plantas de cobertura são consideradas como um fator importante para proteção do solo, mantendo a sua umidade ao longo do tempo, além da melhoria na estrutura do solo e o maior aporte de nutrientes e matéria orgânica através do uso dos seus resíduos como adubação verde e proteção do solo contra agentes da erosão e radiação solar. Destas, as gramíneas, por possuírem maior volume de raiz, melhoram a porosidade e agregação do solo, apresentando uma boa associação com as leguminosas. A relação C/N mais elevada faz com que os resíduos permaneçam por mais tempo sobre o solo, favorecendo o estabelecimento da cobertura e a fixação de nitrogênio, melhorando as condições físicas e químicas do solo.

Algumas espécies de plantas leguminosas possuem um papel chave na fixação do nitrogênio no solo através da simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio que são capazes de transformar o N_2 atmosférico em nitrogênio inorgânico assimilável pelas plantas. Dessa forma essas plantas leguminosas são necessárias para disponibilizar o nitrogênio no solo para culturas sucessoras. Essa disponibilidade pode ser elevada num solo devido à rápida decomposição dos seus resíduos culturais.

2.3 Indicadores de qualidade do solo

Um atributo de qualidade do solo (indicador) é uma propriedade do solo mensurável, tendo uma capacidade de influência no desempenho de uma função específica do solo (ACTON; PADBURY, 1993). Os indicadores que podem ser sugeridos refletem mudanças em escala temporal e espacial. Podendo alguns serem mais sensíveis às práticas de manejo utilizadas, sendo afetados por processos de degradação do solo.

Os indicadores chave são selecionados para a avaliação e o monitoramento da qualidade do solo visando medir as propriedades do solo. Para se ter uma precisão na obtenção de um índice de qualidade do solo, há a

necessidade de análise de muitos parâmetros, o que requer tempo e recurso financeiro, sendo por isso muitas vezes inviável (MORARI et al., 2008). Segundo Andrews et al. (2002), um número reduzido de indicadores (conjunto mínimo de dados) escolhidos com a devida cautela forneceria informações adequadas sobre uma função relevante do solo.

Dessa forma, tem-se métodos de seleção de indicadores, baseado no Conjunto Mínimo de Dados (CMD), e no Conjunto Total de Dados (CTD). Ambos têm sido amplamente utilizados para a avaliação da qualidade do solo (DORAN; PARKIN, 1994; KARLEN et al., 1998; LARSON; PIERCE, 1991).

Mesmo com a cautela na seleção dos indicadores, é preciso avaliar a evolução temporal da qualidade do solo para a averiguação da sustentabilidade das práticas de manejo, pois, por trás de um retrato atual de um solo com altos valores de qualidade, pode-se ter um solo em processo de esgotamento da sua fertilidade (MORARI et al., 2008).

A seleção dos indicadores baseada no Conjunto Total de Dados representa as características específicas de análise do solo, já o Conjunto Mínimo de Dados faz uma coleção de indicadores, os quais são escolhidos pela sua facilidade de medição e correlação entre os indicadores (ANDREWS et al., 2002; GOMEZ et al., 2009).

Além das funções de interesse do solo, os indicadores de qualidade devem ser selecionados de acordo os objetivos de manejo definidos para o sistema. Muitas vezes, por serem individualizados, focam principalmente nos efeitos da exploração agrícola, mas também podem ser sociais, incluindo os efeitos ambientais mais amplos provindos de decisões de gestão agrícola, tais como a erosão do solo, a contaminação do solo e da água, ou o desequilíbrio de subvenção (a respeito do uso de combustíveis fósseis ou agrotóxicos) (RAPPORT et al.,

1997). Algumas das funções do solo relacionam-se a objetivos de sustentabilidade os quais podem-se mencionar: (1) promoção do crescimento da planta; (2) divisão e regulação da água; e (3) habilidade para agir como um tampão ou filtro ambiental (ANDREWS et al., 2002).

Uma vez que os objetivos de manejo do sistema são identificados, a indexação da qualidade do solo envolve três etapas principais: (1) escolha dos indicadores apropriados para um conjunto mínimo de dados (CMD); (2) transformação da pontuação dos indicadores; e (3) combinação das pontuações dos indicadores dentro do índice (ANDREWS et al., 2002).

Estudos desenvolvidos por Andrews et al. (2002), examinando a eficácia relativa dos diversos métodos de indexação da qualidade do solo, utilizaram-se de uma comparação entre métodos alternativos de indexação, baseando-se em opinião de especialistas e na Análise de Componentes Principais (PCA) para a seleção do conjunto mínimo de dados. A opinião de especialistas também foi sugerida por Zhang et al. (2004) e segundo os quais os efeitos de alguns fatores relacionados a produtividade da terra não seriam facilmente demonstrados por equações matemáticas. Dessa forma, métodos, como o Delphi (QUI et al., 2009), seriam muitas vezes usados para proceder a uma opinião confiável na seleção de indicadores.

Além das considerações sobre as funções do solo e os objetivos de gestão, é necessário o foco na sustentabilidade e não apenas no rendimento das culturas, sendo que um IQS (Índice de Qualidade do Solo) pode ser visto como um componente de um compreensivo sistema hierárquico de avaliação do manejo do agroecossistema. Os indicadores e os índices resultantes devem refletir não apenas a função do solo, mas também os aspectos do desempenho do agroecossistema maior como delineada por metas para a gestão sustentável (ANDREWS; CARROLL, 2001).

A avaliação da qualidade do solo é primordial em muitas questões que dizem respeito à sustentabilidade. Essa avaliação e o direcionamento de mudança com o decorrer do tempo é o principal indicador de uma agricultura sustentável (KARLEN et al., 1997).

2.4 Desenvolvimento de índices de qualidade do solo

O desenvolvimento de índices de qualidade do solo é baseado na ideia de que as propriedades do solo por si só não são suficientes para se obter uma medida adequada da qualidade do solo. Dessa forma, a integração dos indicadores de qualidade do solo, baseada em uma combinação de propriedades do solo, poderia apresentar um melhor reflexo da qualidade do solo do que os parâmetros individuais (MASTO et al., 2007).

Depois de identificado os parâmetros críticos ou feito o arranjo do conjunto mínimo de dados, procede-se ao cálculo do IQS através de funções específicas como as funções de pedotransferência (LARSON; PIERCE, 1991) ou funções de pertinência de conjuntos lineares ou não-lineares (ASKARY; HOLDEN, 2015).

O Índice de Qualidade Integrado (IQI), desenvolvido a partir do índice de qualidade de Doran e Parkin (1994), possui uma combinação dos valores de peso de todos os indicadores selecionados em um índice, através de uma equação que utiliza um sistema de pontuação simples (QI et al., 2009). Como outra forma, o modelo desenvolvido por Nemoro (JIE-LIANG et al., 2006; QIN; ZHAO, 2000), tem como base a média e uma pontuação mínima do indicador. Islam e Weil (2000) também sugeriram um modelo para determinação do índice de deterioração, sendo este mais tarde utilizado por Araújo et al. (2007). Um índice geral da qualidade do solo poderia ser montado através da comparação de dados de atributos de solos de áreas naturais sem intervenção antrópica.

Estudos desenvolvidos por Askari e Holden (2015), testaram diferentes procedimentos de integração de indicadores e obtiveram melhor habilidade de discriminação entre os diferentes sistemas de manejo através do uso de índices integrados aditivos não ponderados e pontuados através de funções de pertinência lineares. A avaliação visual da estrutura do solo foi usada para validação dos índices, esta permite a consideração de uma gama de características do solo tais como força de agregação, forma, porosidade e raízes, que são características críticas para a qualidade do solo no geral (BALL et al. 2007; GUIMARÃES et al. 2011; ASKARI et al. 2015).

Sob o aspecto da avaliação visual do solo, a espectroscopia de imagem aérea é também uma ferramenta útil para a avaliação das propriedades e da qualidade do solo durante as alterações antrópicas provocadas pelo seu uso e manejo. O mapeamento espectral possibilita o desenvolvimento de índices de qualidade do solo espectrais (PAZ-KAGAN et al, 2015). Essa e outras técnicas são imprescindíveis para um maior enfoque em estudos sobre a qualidade do solo.

2.5 A lógica Fuzzy

A lógica Fuzzy ou a teoria dos conjuntos Fuzzy vem sendo amplamente usada em trabalhos que envolvem a dinâmica do meio ambiente. Os conjuntos Fuzzy são os que não possuem fronteiras bem definidas, representando a incerteza que pode ser traduzida em uma imprecisão benéfica para lidar com as limitações apresentadas pelos conjuntos clássicos da lógica convencional ou Booleana. Na lógica Fuzzy não ocorre uma transição abrupta de classes como na convencional, mas sim suave (TANAKA, 1997).

Um dado conjunto Fuzzy A qualquer é definido no universo do discurso X por meio de funções específicas denominadas funções de pertinência $\mu_A(x)$. Essas associam a cada elemento x um dado número no intervalo fechado $[0,1]$, o que caracteriza o grau de pertinência de x ao conjunto Fuzzy (ZADEH, 1965).

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1]$$

O subconjunto dos pontos x de X tal que $\mu_A(x) > 0$ é denominado conjunto suporte de um conjunto fuzzy A . Um conjunto fuzzy cujo suporte é um único ponto de X com $\mu_A = 1$ é chamado de um conjunto unitário fuzzy.

Os processos de tomada de decisão baseiam-se na habilidade de codificação de conhecimento inexato devido à lógica Fuzzy. A incerteza e a imprecisão de uma informação obtida através desse conhecimento são modeladas através de subintervalos de $[0,1]$ que atribuem valores verdades às proposições fuzzy dentro de uma extensão conhecida como lógica fuzzy intervalar (TAKAHASHI; BEDREGAL, 2006).

Ao contrário da lógica convencional, ou Booleana, a lógica Fuzzy admite a ideia de que tudo está relacionado a um determinado conjunto segundo um grau de pertinência. Através da lógica Fuzzy, pode-se modelar o senso comum do ser humano. Enquanto que na teoria dos conjuntos clássicos da lógica convencional a decisão seria conforme a função 1, na lógica Fuzzy, considerando um elemento x com um grau de pertinência ao conjunto A , seria conforme a função 2.

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{se, somente se, } x \in A \\ 0 & \text{se, somente se, } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{se, somente se, } x \in A \\ 0 \leq \mu(x) \leq 1 & \text{se } x \text{ pertence parcialmente a } A \\ 0 & \text{se, somente se, } x \notin A \end{cases} \quad (2)$$

O desenvolvimento de sistemas fuzzy deve primeiramente passar pela escolha das variáveis de entrada a serem analisadas, após isso são determinadas

as regras de associação fuzzy que relacionem os parâmetros de entrada aos dados de saída no sistema fuzzy.

2.5.1 Dinâmica da qualidade do solo com base na Lógica Fuzzy

Índices de qualidade do solo podem ser elaborados com base na lógica Fuzzy, a qual é especialmente visada para avaliar a qualidade dinâmica de solos agricultáveis, levando-se em conta suas características intrínsecas. Cabe assim a seleção dos atributos do solo determinantes no cultivo agrícola, quais indicadores seriam mais adequados para a quantificação tanto física, química ou biológica da qualidade do solo, a influência desses indicadores nos solos agricultáveis, expressa por meio de funções de pertinência e, por fim, a importância relativa desses atributos num respectivo índice final (RODRÍGUEZ et al., 2016).

Estudos metodológicos desenvolvidos por Ghaemi et al. (2014) que tenham a possibilidade de uso de um prático e simples índice de qualidade com metodologia fuzzy possibilitaram uma abordagem que melhor poderia interpretar as variações no entendimento da qualidade do solo. Esses índices tiveram uma maior correlação com o rendimento da cultura. A partir da abordagem da metodologia fuzzy, as funções de pertinência são geradas de acordo a importância agrícola do indicador na área de estudo. O grau de perfeição dos indicadores estudados foi expresso conforme um conjunto fuzzy da definição de Zadeh (1965). Segundo essa definição, os indicadores de qualidade do solo de importância em terras agricultáveis estariam relacionados a um conjunto finito de fenômenos através das funções de pertinência.

2.5.1.1 Regras de associação fuzzy

Numa transformação de um conjunto de indicadores de qualidade do solo, pontuações sem unidade e combináveis entre si são atribuídas a esses num intervalo entre 0 e 1, sendo 1 a representação do nível ótimo desse indicador. A partir da contribuição dessas pontuações para funções do solo, o uso da abordagem

fuzzy pôde ser proposto por Wymore (1993), no qual funções de pertinência não-lineares foram usadas para gerar três formatos de curvas de pontuação: *mais é melhor* (uma curva de formato sigmoidal com assíntota superior), *menos é melhor* (uma curva de formato sigmoidal com assíntota inferior), e *ótimo* (uma curva em forma de sino). Armenise et al. (2013) também usaram esses modelos não-lineares, estabelecendo um completo entendimento entre os indicadores e a qualidade do solo, de forma a obter a função mais adequada na qual deveriam ser pontuados. Funções de pertinência lineares também podem ser utilizadas, obtendo-se a partir delas resultados satisfatórios para modelos de indexação (ASKRARI; HOLDEN, 2015).

REFERÊNCIAS

- ACTON, D.F.; PADBURY, G.A. A conceptual framework for soil quality assessment and monitoring. In: O.F. Acton (Editor), A Program to Assess and Monitor Soil Quality in Canada: Soil Quality Evaluation Program Summary (interim). Centre for Land and Biological Resources Research, No. 93-49, Agriculture Canada, Ottawa, 1993.
- ANDREWS, S. S., CARROLL, R. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agro-ecosystem management. *Ecological Applications*, Washington D.C., v. 11, n. 6, p. 1573-1585, dez. 2001.
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; MITCHELL, J. P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, ecosystems & environment*, v. 90, n. 1, p. 25-45, 2002.
- ARAÚJO, R.; GOEDERT, W.J.; LACERDA, M.P.C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob Cerrado nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, n.0, p.1099-1108, 2007.
- ARMENISE, E.; REDMILE-GORDON, M.A.; STELLACCI, A.M.; CICCARESE, A.; RUBINO, P. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research*, v. 130, p. 91-98, 2013.
- ASKARI, M. S.; HOLDEN, N. M. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. *Soil and Tillage Research*, v. 150, p. 57-67, 2015.
- ASKARI, M. S.; O'ROURKE, S. M.; HOLDEN, N. M. Evaluation of soil quality for agricultural production using visible–near-infrared spectroscopy. *Geoderma*, v. 243, p. 80-91, 2015.
- BALL, B. C.; BATEY, T.; MUNKHOLM, L. J. Field assessment of soil structural quality—a development of the Peerlkamp test. *Soil Use and Management*, v. 23, n. 4, p. 329-337, 2007.
- BERTONI, J., LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. Piracicaba: Ceres, 1985. 392p. ---. ---. São Paulo: Ícone, 1990. 355p
- BRADY, Nyle C.; WEIL, Ray R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. Bookman Editora, 2009.

- BROOKES, P. C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. *Biology and Fertility of soils*, v. 19, n. 4, p. 269-279, 1995.
- CARDOSO, D. P.; SILVA, M. L. N.; CARVALHO, G. J.; FREITAS, D. A. F.; AVANZI, J. C. Plantas de cobertura no controle das perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 6, p. 632-638, 2012.
- 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 sustainable environment*. Madison: Soil Science Society of America Proceedings, 1994. p. 03-21.
- DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORA, J.W & JONES, A.J., eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, Soil Science Society of America, 1996. p.25-37. (SSSA Special Publication, 49)
- DORAN, J.W. Soil quality and sustainability. In: *Proceedings of the XXVI Brazilian Congress of Soil Science*, Rio de Janeiro, Brazil, 20–26.1997.
- GHAEMI, M.; ASTARAEI, A. R.; MAHALATI, M. N.; EMAMI, H.; SANAEINEJAD, H. H. Spatio-temporal soil quality assessment under crop rotation irrigated with treated urban wastewater using fuzzy modelling. *International Agrophysics*, v. 28, n. 3, p. 291-302, 2014.
- GÓMEZ, J. A.; ÁLVAREZ, S.; SORIANO, M. A. Development of a soil degradation assessment tool for organic olive groves in southern Spain. *Catena*, v. 79, n. 1, p. 9-17, 2009.
- GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. *Soil quality for crop production and ecosystem health*. Amsterdam, Elsevier, 1997. 448p.
- GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A. Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use and Management*, v. 27, n. 3, p. 395-403, 2011.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 79, n. 1, p. 9-16, 2000.
- JIE-LIANG, CHENG; ZHOU, S. H. I.; YOU-WEI, Z. Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of Zhejiang Province, China. *Journal of environmental sciences (China)*, v. 19, n. 1, p. 50-54, 2006.

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; SCHUMMAN, G. E. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, v. 61, n. 1, p. 4-10, 1997.

KARLEN, D. L.; GARDNER, J. C.; ROSEK, M. J. A soil quality framework for evaluating the impact of CRP. *Journal of Production Agriculture*, Madison, v. 11, n. 1, p. 56-60, jan./mar. 1998.

KARLEN, D. L.; DITZLER, C. A.; ANDREWS, S. S. Soil quality: why and how? *Geoderma*, Amsterdam, v. 114, n. 3/4, p. 145-156, 2003.

KIMPE, C. R.; WARKENTIN, B.P. Soil functions and the future of natural resources. *Adv. In Geo Ecology*, 31: 3-10, 1998.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. Conservation and enhancement of soil quality. In: DUMANSKI, J. *Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World*, vol. 2. IBSRAM, Bangkok, 1991. p. 175-203.

LEITE, M. H. S.; COUTO, E.G.; AMORIM, S.S.; COSTA, E.L.; MARASCHIN, L. Perdas de solo e nutrientes num Latossolo Vermelho-Amarelo ácrico típico, com diferentes sistemas de preparo e sob chuva natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 689-699, June 2009.

MASTO, R. E.; CHHONKAR, P. K.; SINGH, D.; PATRA, A. K. Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol. *Agriculture, ecosystems & environment*, v. 118, n. 1, p. 130-142, 2007.

MENDONCA, V. Z.; Mello, L. M. M., ANDREOTTI, M.; Cristiano Magalhães PARIZ, C. M.; YANO, E. H.; PEREIRA, F. C. B. L. Nutrient release from forage straw intercropped with maize and followed by soybean. *Rev. Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 183-193, fev. 2015.

MORARI, F.; LUGATO, E.; GIARDINI, L. Olsen phosphorus, exchangeable cations and salinity in two long-term experiments of north-eastern Italy and assessment of soil quality evolution. *Agriculture, ecosystems & environment*, v. 124, n. 1, p. 85-96, 2008.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I; SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 5, p. 1777-1785, 2011.

PAZ-KAGAN, T.; ZAADY, E.; SALBACH, C.; SCHMIDT, A.; LAUSCH, A.; ZACHARIAS, S.; NOTESCO, G.; BEN-DOR, E.; KARNIELI, A. Mapping the Spectral Soil Quality Index (SSQI) Using Airborne Imaging Spectroscopy. *Remote Sensing*, v. 7, n. 11, p. 15748-15781, 2015.

QI, Y.; DARILEK, J.L.; HUANG, B.; ZHAO, Y.; SUN, W.; GU, Z. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, v. 149, n. 3, p. 325-334, 2009.

QIN, M. Z.; ZHAO, J. Strategies for sustainable use and characteristics of soil quality changes in urban-rural marginal area: a case study of Kaifeng. *Acta Geographica Sinica*, Pequim, v. 55, n. 5, p. 545-554, jun. 2000. (em Chinês com resumo em Inglês).

RAPPORT, D. J.; MCCULLUM, J.; MILLER, M.H. Soil health: its relationship to ecosystem health. *Biological indicators of soil health.*, p. 29-47, 1997.

RODRÍGUEZ, E.; PECHE, P.; GARBISU, C.; GOROSTIZA, I.; EPELDE, L.; ARTETXE, U.; IRIZAR, A.; SOTO, M.; BECERRIL, J. M.; ETXEBARRIA, J. Dynamic Quality Index for agricultural soils based on fuzzy logic. *Ecological Indicators*, v. 60, p. 678-692, 2016.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, LFC de. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 2, p. 115-123, 2010.

TANAKA, K. *An Introduction to Fuzzy Logic for Practical Applications* – New York, EUA: Springer, 1997.

TAKAHASHI, A.; BEDREGAL, B.R.C. T-normas, t-conormas, complementos e implicações intervalares. *Trends in Applied and Computational Mathematics*, v. 7, n. 1, p. 139-148, 2006.

USDA-NRCS. Soil Quality Institute, Ames, IA. Disponível em: <http://soils.usda.gov/sqi/> Acesso em: 22 de jan. 2015.

ZADEH, L.A. Fuzzy sets. *Inform. Control*, 8(6), 338-353, 1965.

ZHANG, B.; Zhang, Y.; Chen D.; White, R. E.; Li, Y. A quantitative evaluation system of soil productivity for intensive agriculture in China. *Geoderma*, v. 123, n. 3, p. 319-331, 2004.

WIENHOLD, B. J.; ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L. Soil quality: a review of the science and experiences in the USA. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 26, n. 2, p. 89-95, 2004.

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 Press, Inc., Boca Raton, FL. 1993.

CAPÍTULO 2

ÍNDICES DE QUALIDADE DO SOLO PARA AVALIAÇÃO DO MANEJO DE PLANTAS DE COBERTURA NO CONTROLE DA EROSÃO HÍDRICA NO SUL DO ESTADO DE MINAS GERAIS

RESUMO

A avaliação da qualidade do solo em diferentes sistemas agrícolas é essencial para a verificação do seu estado atual. Para que isso seja possível, é necessária a utilização de diferentes indicadores da qualidade do solo através de conjuntos de atributos físicos e químicos. Esse trabalho tem por objetivo propor uma avaliação da qualidade do solo por meio de diferentes metodologias de indexação na abordagem Fuzzy, comparando a capacidade de plantas de cobertura cultivadas em sistemas de manejos diversos no controle da erosão hídrica. O experimento foi conduzido em ciclos anuais entre 2007 e 2014 no campus da Universidade Federal de Lavras, município de Lavras – MG. As parcelas experimentais foram instaladas em 2007 em um solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, a partir do qual foram avaliadas espécies de plantas de cobertura (crotalária (*Crotalaria juncea* L.), milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Brown), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC), feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) e o cultivo do milho (*Zea mays* (L))). Como referência para o estudo, realizou-se também amostragem em área sob mata nativa nas proximidades. Atributos físicos e químicos foram selecionados para composição de um conjunto menor de dados. Dentre os dois modelos de indexação da qualidade do solo analisados, o índice de qualidade Nemoro melhor representou o último ciclo de cultivo na área de estudo em comparação ao modelo integrado aditivo. Os modelos apresentaram excelente correlação entre si, o que explica o comportamento da qualidade do solo entre os diferentes usos e manejos avaliados durante os ciclos amostrais de cultivo do solo.

Palavras-chave: Plantas de Cobertura. Conservação do Solo. Erosão hídrica. Qualidade do Solo.

ABSTRACT

The evaluation of soil quality in different agricultural systems is essential to check its current state. For this to be possible, the use of different indicators of soil quality through sets of physical and chemical attributes is required. This work aims to propose an evaluation of the soil quality through different indexing methods in Fuzzy approach, comparing the ability of cover crops grown in many managements systems to control water erosion. The experiment was conducted at different annual cycles between 2007 and 2014 on the campus of the Federal University of Lavras, Lavras - MG. The experimental plots were installed in 2007 in a soil classified as Red-Yellow Latosol, from which were evaluated species of cover crops (sun hemp (*Crotalaria juncea* L.), millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Brown), jack bean (*Canavalia ensiformis* (L.) DC), pigeon pea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) and maize cultivation (*Zea mays* (L))). As a reference for the study, also used sampling in area under native forest nearby. Physical and chemical attributes were selected for composition of a smaller set of data. Of the two models index of soil quality analysis, quality score Nemoro best represented the last crop cycle in the study area compared to the integrated additive model. The models showed excellent correlation with each other, which explains the quality of soil behavior between the different uses and managements evaluated during the sampling cycles of soil cultivation.

Keywords: Cover of plants. Soil conservation. Water erosion. Soil Quality.

1 INTRODUÇÃO

Estudos sobre a qualidade do solo são importantes, tendo-se em vista um diagnóstico atual do solo através da análise dos seus parâmetros indicadores de qualidade. Dessa forma, pode-se ter uma interpretação do estado do solo, ou como termo condizente, a saúde do solo.

Doran e Parkin (1996) definiram a qualidade do solo como sendo “ a capacidade do solo funcionar dentro dos limites do uso da terra e do ecossistema, para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental, e promover a sanidade vegetal e animal”.

Um indicador dentro do índice de qualidade do solo evidencia a capacidade de produção sustentável de acordo com o modelo a ser empregado para determinação do índice de qualidade. Um índice de qualidade apresenta-se como um valor numérico que melhor relaciona a condição dos atributos do solo ao seu comportamento dentro de determinado sistema agrícola ou natural.

O desenvolvimento de índices que possam quantificar a qualidade do solo pode ser realizado a partir de três passos. De início, definem-se os indicadores de qualidade dentre os atributos do solo, sendo esses: químicos e físicos; atribui-se uma pontuação para cada indicador, e por último, integram-se os indicadores em um único índice (Karlen et al., 2003). Os indicadores são avaliados de acordo a sua contribuição para uma determinada função do solo com o método específico que define o conjunto de dados a serem utilizados em um modelo de índice de qualidade (QI et al., 2009).

A qualidade do solo como sendo inerente ou dinâmica é importante para a observação das mudanças estruturais que se manifestam ao longo do tempo no solo. A indexação dessa qualidade por meio da conjunção dos atributos do solo

melhor avaliados como indicadores é uma premissa indispensável para a avaliação do dinamismo no solo partindo-se da abordagem matemática quantitativa da qualidade do solo.

Estudos desenvolvidos por Cândido et al. (2015), utilizando os índices de Qualidade Integrado (IQI) e o Índice de Qualidade Nemoro (IQN) mostraram sensibilidade entre os diferentes tipos de manejo do solo quanto à erosão hídrica. A qualidade do solo apresentou-se menor em solo descoberto e maior em plantios de eucalipto em nível com resíduo e vegetação nativa, diminuindo as perdas de água e solo. O cultivo mínimo contribui para que índices de qualidade do solo tornem evidente a importância da manutenção de resíduos sobre o solo.

Considerando-se a avaliação da qualidade do solo em latossolos de Minas Gerais sob ecossistemas naturais e manejo de eucalipto, Freitas et al. (2012) puderam concluir que sistemas de manejo florestal sofrem diminuição da qualidade do solo em comparação a áreas sob vegetação nativa. Esses mesmos sistemas, quando combinados a lavouras e pastagens, sistema agrossilvopastoril, são capazes de garantir valores de qualidade do solo superiores a sistemas de referência. Isso se deve ao maior aporte de resíduos no solo e a liberação contínua de nutrientes ao longo do tempo.

O acúmulo de serapilheira condiciona solos com baixos agravamentos do estado de seus atributos devido ao fator reflorestamento em relação a pastagens degradadas e ao cultivo convencional. Em pesquisa realizada por Lima et al (2016) determinou-se o índice de qualidade do solo em relação a atributos químicos e físicos, avaliando a utilização deste índice em relação a pagamentos por serviços ambientais. Os valores de índices gerados foram influenciados tanto pela substituição da mata nativa por povoamento de eucalipto, quanto por pastagens e culturas anuais, refletindo na redução da qualidade do solo.

Espécies de plantas de cobertura do solo como gramíneas e leguminosas podem ser de grande utilidade quando o uso é estabelecido através de sistemas agrícolas que melhorem as condições do solo. Através da melhoria da estrutura e do incremento de matéria orgânica e outros nutrientes no solo, tem-se também uma melhoria das condições agrícolas junto a sua conservação e equilíbrio na recarga de água.

Portanto este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade do solo por dois diferentes modelos de indexação dos indicadores de qualidade em sistemas agrícolas com histórico de uso de plantas de cobertura do solo, baseando-se na abordagem da teoria dos conjuntos fuzzy.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do estudo foram utilizados dados relativos aos anos de 2007 a 2014 correspondentes a um experimento realizado no campus da Universidade Federal de Lavras, localizado nas coordenadas 21°13'20'' S e 44°58'17'' W, com aproximadamente 925 m de altitude e classificação climática Cwb segundo Alvares et al. (2013). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura argilosa, com declividade de 12%.

Foram utilizados sistemas de manejos diferenciados, variando as plantas utilizadas em cada parcela, espaçamento entre linhas de plantio, consórcios entre leguminosas e gramíneas, plantio em nível ou no sentido do declive. As plantas de cobertura utilizadas foram a crotalária (*Crotalaria juncea*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), feijão-guandu (*Cajanus cajan*), milheto (*Pennisetum glaucum*), e milho (*Zea mays*). Foi considerado um quadro com características de cultivo, arranjos e histórico da área.

Tabela 1 - Uso do solo com plantas de cobertura, suas formas de manejo e simbologia utilizada

Tratamentos	Espaçamento entre linhas de plantio (cm)	Plantio	Simbologia
Ciclo de cultivo 2007/08			
Feijão-de-porco	50	D	FP ₅₀
Crotalária	50	D	C ₅₀
Milheto	50	D	Mt ₅₀
Milheto	25	D	Mt ₂₅
Feijão-de-porco	25	D	FP ₂₅
Crotalária	25	D	C ₂₅
Ciclo de cultivo 2008/09			
Crotalária	50	D	C
Milheto + Feijão-guandu	25	D	Mt+FG
Feijão-de-porco	50	D	FP
Feijão-guandu	50	D	FG ₈
Milheto	50	D	Mt
Milheto + Crotalária	25	D	Mt+C
Ciclo de cultivo 2009/10			
Crotalária	50	D	C
Milheto + Feijão-guandu	25	D	Mt+FG
Feijão-de-porco	50	D	FP
Feijão-guandu	50	D	FG
Milheto	50	D	Mt
Milheto + Crotalária	25	D	Mt+C
Solo descoberto	-	-	SD
Ciclo de cultivo 2010/11			
Milheto	50	N	Mt _N
Milheto	50	D	Mt _D
Feijão-de-porco	50	N	FP _N
Feijão-de-porco	50	D	FP _D
Feijão-guandu	50	N	FG _N
Feijão-guandu	50	D	FG _D
Solo descoberto			SD
Ciclo de cultivo 2011/12			
Milho + Feijão-guandu	50	-	Mo+FG

Milho + Feijão-de-porco	50	N	Mo+FP
Milho	50	N	Mo
Feijão-de-porco	50	N	FP
Solo descoberto	-	-	SD
Ciclo de cultivo 2012/13			
Milho	50	N	Mo
Feijão-de-porco	50	N	FP
Milho + Feijão-de-porco	50	N	Mo+FP
Solo descoberto	-	-	SD
Ciclo de cultivo 2013/14			
Feijão-de-porco	50	N	FP
Milho + Feijão-de-porco	50	N	Mo+FP
Feijão-de-porco	50	N	FP
Milho	50	N	N
Solo descoberto	-	-	SD
Mata nativa*	-	-	MN

N = Plantio em Nível, D = Plantio no sentido do declive

* Área de vegetação nativa amostrada como referência

Os arranjos experimentais foram constituídos em um histórico de cultivo de 2007 a 2014, onde foram realizadas amostragens para determinação de atributos físicos e químicos. Após a obtenção de maiores resultados de cobertura vegetal, plantas foram cortadas e a sua palhada, mantida sobre o solo. Algumas parcelas foram mantidas com o solo descoberto simulando a situação de degradação. No último ciclo de cultivo, os tratamentos também foram comparados com uma situação de equilíbrio como vegetação de mata nativa.

Durante o histórico de uso da área foram realizadas coletas de água e sedimentos nas parcelas amostradas para obtenção direta das perdas de solo e água para cada um dos tratamentos avaliados.

Os atributos do solo foram avaliados em todos os anos de cultivo do solo, considerando-se o período após a decomposição da palhada. Durante os ciclos anuais de cultivo foram analisados os atributos físicos: densidade do solo

(BLAKE; HARTGE, 1986), volume total de poros (DANIELSON et al., 1986), micro e macroporosidade (GROHMANN, 1960), estabilidade de agregados expressa em DMG (EMBRAPA, 2011) e condutividade hidráulica do solo saturado (EMBRAPA, 2011). Para os atributos químicos foram analisados o pH em água, fósforo (P), potássio (K^+), os parâmetros de fertilidade (Al^{3+} , SB e CTCp) e a matéria orgânica do solo (MOS) conforme Embrapa (2011). Dentre esses atributos foram selecionados para formação de um conjunto de indicadores de qualidade do solo através de opinião de especialista soma de bases trocáveis, matéria orgânica do solo, porosidade total, macroporosidade, densidade do solo, estrutura do solo expressa em DMG. Esses indicadores se relacionam com a conservação do solo e da água, adequando os sistemas de manejo no contexto da erosão hídrica.

Para solucionar a incompatibilidade entre as unidades dos diferentes indicadores selecionados, foram utilizadas funções de pertinência Fuzzy (Tabela 2) (ANDREWS et al., 2002; QI et al., 2009; RAHMANIPOUR et al., 2014), tendo pontuações variando entre 0 e 1 e atribuídas a cada indicador. De acordo a sensibilidade de cada indicador da qualidade do solo, funções do tipo “Mais é melhor”, “Menos é melhor” e “Valor ótimo” serão aplicadas, no qual a melhor funcionalidade do solo estará associada a valores altos e baixos respectivamente (LIEBIG et al, 2001).

Após a seleção dos indicadores, os valores máximo e mínimo de cada um serão considerados como limites inferiores (L) e superiores (U) (QI et al., 2009, RAHMANIPOUR et al., 2014). Com esses valores, aplicar-se-á as devidas funções de pontuação padrão (Tabela 2), onde x é o valor do indicador selecionado em cada amostra de solo e $f(x)$, o valor normalizado de cada indicador. Para a variável porosidade do solo foi utilizado a função trapezoidal $f(x)$ para os limites

críticos L_1 , L_2 , U_1 , U_2 como sendo 45, 50, 55 e 60, respectivamente (XU et al., 2016).

Tabela 2 - Funções de pontuação padrão (Pertinência Fuzzy) para cada indicador selecionado

Tipo de função	FP Fuzzy
Mais é melhor (MB)	$f(x) = \begin{cases} 0,1 & x \leq L \\ 0,9 \frac{x-L}{U-L} + 0,1 & L < x < U \\ 1 & x \geq U \end{cases}$
Menos é melhor (LB)	$f(x) = \begin{cases} 1 & x \leq L \\ 1 - 0,9 \frac{x-L}{U-L} & L < x < U \\ 0,1 & x \geq U \end{cases}$
Valor ótimo (O)	$f(x) = \begin{cases} 0,1 & x \leq L_1 \text{ ou } x \geq U_2 \\ 0,9 \frac{x-L_1}{L_2-L_1} + 0,1 & L_1 < x < L_2 \\ 1 & L_2 \leq x \leq U_1 \\ 0,9 \frac{x-U_1}{U_1-U_2} + 0,1 & U_1 < x < U_2 \end{cases}$

Fonte: Adaptado de Qui et al. (2009)

Cada indicador foi pontuado pelas funções de pertinência com valores entre 0 e 1 (FIGURA 1), e um valor alto, mais próximo de 1, sugeriu uma maior contribuição deste para a explicação do fenômeno examinado (RAHMANIPOUR et al., 2014).



Figura 1 - Comportamento das funções de pertinência Fuzzy para alguns indicadores selecionados.

O Índice de Qualidade Integrado aditivo (Eq. (1)) (IQIaditivo) (ANDREWS et al., 2002; GONG et al., 2015) e o índice de Qualidade Nemoro (IQN) (QIN; ZHAO, 2000) (Eq. (2)) foram utilizados como modelos de indexação da qualidade do solo.

Índice de Qualidade Integrado aditivo

Por esse método, os valores de pontuação de todos os indicadores selecionados serão combinados em um índice através da equação:

$$\text{IQI aditivo} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{n} \quad (1)$$

Onde S_i , a pontuação fuzzy de cada indicador e n , o número de indicadores.

Índice de Qualidade Nemoro

Baseia-se na média e na nota mínima do indicador, sem considerar o seu peso. Dessa forma, os resultados são afetados pela pontuação mínima do indicador.

$$IQN = \sqrt{\frac{P_{med}^2 + P_{min}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n} \quad (2)$$

Onde P_{med} é a média e P_{min} é o mínimo das pontuações dos indicadores selecionados em cada amostra de cada tratamento.

A amostragem foi realizada com três repetições por parcela para determinação dos atributos físicos e químicos. As amostras com estrutura deformada foram coletadas na profundidade de 0-20 cm, sendo secas ao ar e passadas por peneira de 2 mm. Já as de estrutura indeformada foram coletadas com amostrador de Uhland, em cilindros com volume conhecido, numa profundidade de 10 cm. O mesmo procedimento foi realizado em ambiente de mata nativa no último ano de plantio, porém sem parcelamento.

Foi empregada a análise gráfica dos índices finais obtidos com a contribuição dos indicadores selecionados para os modelos de indexação. O método de análise estatística Escalonamento Multidimensional foi utilizado para verificar as similaridades/dissimilaridades nos dados avaliados. Uma análise de correlação linear entre modelos foi realizada para cada ciclo de cultivo estudado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos índices de qualidade pelos métodos IQI aditivo e IQN mostram as tendências influentes dos diferentes arranjos de leguminosas e gramíneas sobre a qualidade do solo ao longo dos anos de cultivo na área amostrada (FIGURAS 2 e 3). As funções de pertinência Fuzzy mostraram-se sensíveis à pontuação das diferentes naturezas dos indicadores de qualidade do solo utilizados.

Em área sobre vegetação de mata nativa, tendem a ter, conforme amostrado, valores significativos elevados de índices de qualidade do solo. Isso é independente da forma de manejo a ser utilizada no solo como prática conservacionista, servindo assim como efeito de comparação. Esses valores, quando comparados aos sistemas de cultivo com plantio de leguminosas e gramíneas, apresentaram bastante elevados.

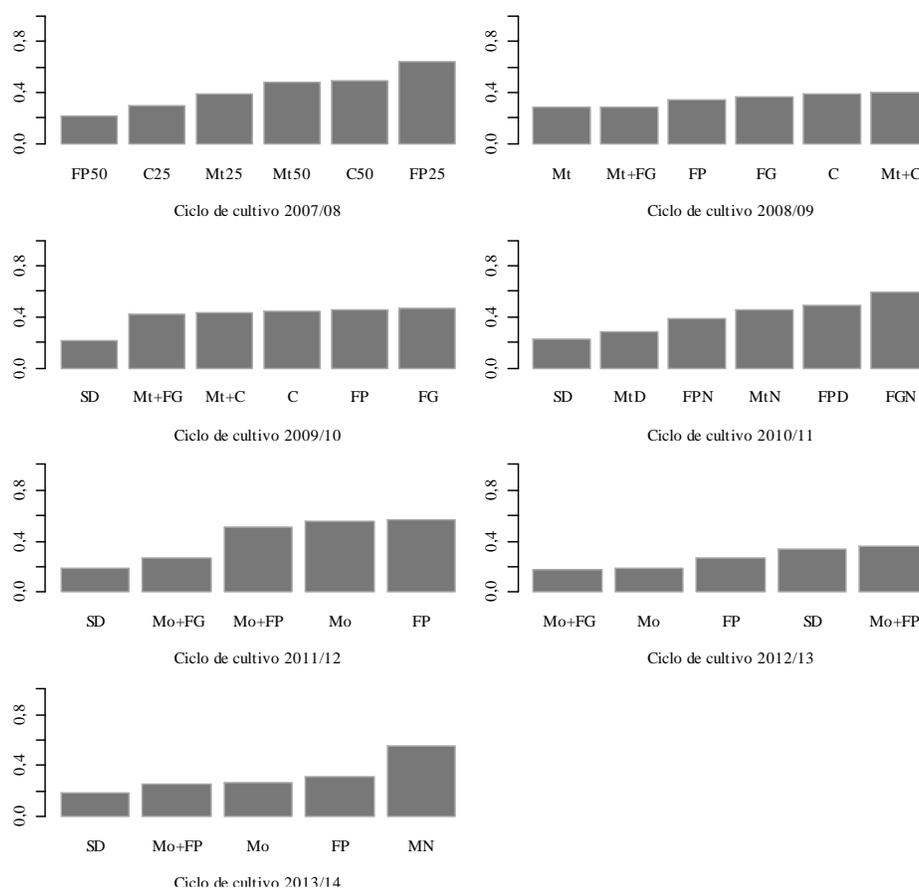


Figura 2 - Índices de qualidade do solo pelo modelo de indexação Nemoro para cada ano de cultivo com espaçamentos entre linhas de plantio, plantio em nível ou desnível e consórcios nos ciclos de cultivo.

Levando-se em consideração os modelos de indexação utilizados, verifica-se que o Nemoro (FIGURA 2) apresenta menores valores em comparação a métodos de integração em acordo com valores encontrados em métodos arbitrários de seleção de indicadores por Qui et al. (2009) e Rahmanipour et al. (2014).

Pelo índice de qualidade do solo Nemoro, pode-se notar uma melhoria da qualidade do solo quando feito uso de leguminosas em comparação às gramíneas. A partir do ciclo de cultivo 2011/12, nota-se uma melhor qualidade do solo com o uso da leguminosa feijão-de-porco, tendo um IQS igual a 0,57 e 0,51, quando em consórcio com milho. Nos ciclos seguintes, mesmo com a alternância de tratamentos nas parcelas amostradas, pôde-se constatar uma predominância qualitativa do feijão-de-porco dentre os tratamentos. Essa foi impulsionada pelo uso do plantio consorciado do milho com o feijão-de-porco.

Observa-se um comportamento semelhante ao apresentado pela figura 3, destacando-se a influência da gramínea milheto na qualidade do solo nos primeiros ciclos de cultivo. Segundo Teixeira et al. (2010), uma quantidade inicial maior de matéria seca advinda do milheto pode ser capaz de compensar a maior velocidade de decomposição da palhada formada pelo consórcio com o feijão-de-porco. Dessa forma, tem-se uma relação C/N intermediária entre os plantios solteiros de milheto e feijão-de-porco. O acúmulo de resíduos de matéria seca subsuperficial dias após o manejo das gramíneas em uma mesma parcela, muito provavelmente contribuiu para o maior IQS observado no solo descoberto após o ciclo de cultivo 2012/13, observados tanto no IQN (FIGURA 2), tanto no IQI aditivo (FIGURA 3).

O feijão-de-porco, por seu rápido recobrimento da superfície do solo devido a sua morfologia foliar, proporciona uma maior proteção contra o desprendimento das partículas do solo provocado pela erosão hídrica. Essa maior

taxa de cobertura do solo e a sua rusticidade foi também identificada por Carvalho et al., (2013). Cabe também salientar estudos com o milho por seu valor comercial agregado após o plantio.

Observando-se a figura 3, pode-se perceber que o modelo integrado aditivo apresentou maiores valores para cada tratamento em comparação ao Nemoro. Esse modelo, por ser aditivo, proporciona uma visualização da contribuição de cada indicador para o índice final, conforme as barras na figura. Da base (Saturação de bases) ao topo (DMG), nota-se o quão bem estruturada ficou a camada superficial do solo para cada tratamento melhor avaliado.

Pela análise gráfica da figura 3, deve-se ponderar que foram utilizados indicadores pontuados através das funções de pertinência *Mais é melhor*, *Menos é melhor* e *Valor ótimo*. Dessa forma confirma-se que os indicadores Densidade do solo, Matéria orgânica do solo e DMG foram preponderantes para uma maior qualidade verificada no tratamento com solo descoberto no ciclo 2012/13. Assim, pode-se inferir que plantios antecessores com o uso de espécies com um abrangente e arranjado sistema radicular, que se decompõe mais lentamente no tempo, contribuíram para uma melhor estruturação do solo. As gramíneas milho e milho, com seu elevado teor de lignina, ou o consórcio dessas com as leguminosas foram importantes no desempenho desse papel.

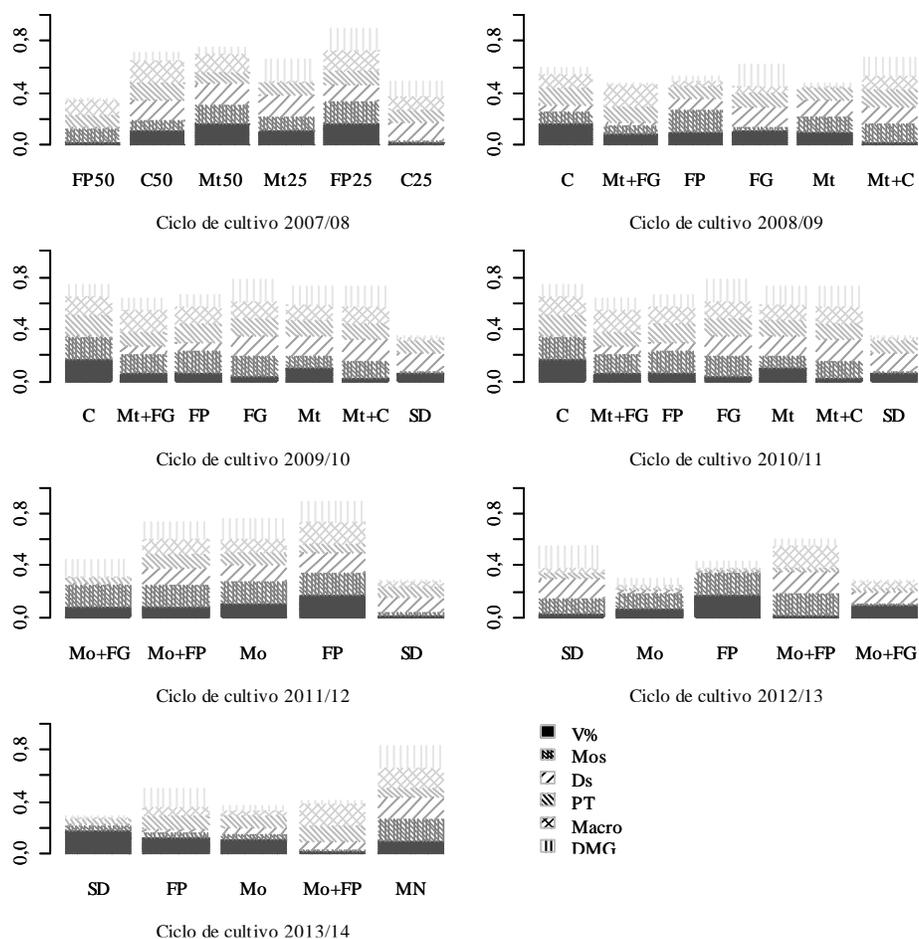


Figura 3 - Índices de qualidade do solo pelo modelo Integrado aditivo para cada ano de cultivo com espaçamentos entre linhas de plantio, plantio em nível ou desnível e consórcios nos ciclos de cultivo. Indicadores de qualidade do solo: V% = Porcentagem de saturação por bases, Mos = Matéria orgânica do solo, Ds = Densidade do solo, PT = Porosidade Total, Macro = Macroporosidade, DMG = Diâmetro médio geométrico.

A representatividade da saturação de bases e da matéria orgânica pelas hachuras na base das barras empilhadas da Figura 3 mostra a ligeira influência das leguminosas, com destaque para o feijão-de-porco na maior parte dos ciclos de cultivos anuais com plantas de cobertura do solo. O último ciclo refletiu o manejo

que vinha sido adotado ao longo dos anos, dando destaque para melhoria da qualidade física do solo. Esse, por ter tido uma amostragem em área sobre vegetação nativa, apresentou um índice de qualidade do solo bastante elevado em comparação aos demais tratamentos. Nesse mesmo ciclo pode-se observar a influência nítida de cada indicador através das barras de hachuras nos índices de qualidade (FIGURA 3).

Alvarenga et al. (2012) e Freitas et al. (2012) também observaram que áreas sob vegetação nativa apresentaram maiores valores de índices de qualidade do solo. Isso demonstra uma garantia de conservação do solo por meio do uso e manejo corretos que promovem uma melhor recarga de água através do processo de infiltração no solo.

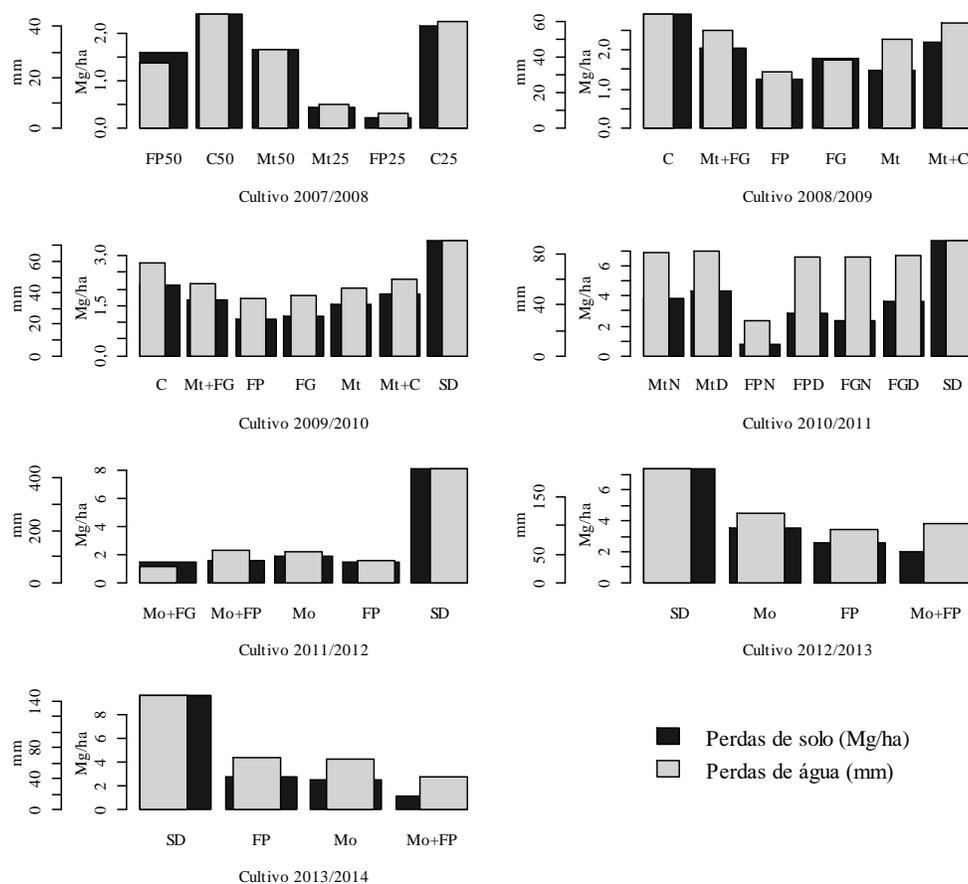


Figura 4 - Perdas de água e solo durante os ciclos de cultivo anuais.

Comparando-se as perdas de água e sedimentos analisados na figura 4 com os índices de qualidade do solo (FIGURAS 2 e 3), observa-se que o ciclo que utilizou o consórcio entre a leguminosa crotalária e a gramínea milheto não foi suficiente para inferir que menores perdas estariam relacionadas com melhor qualidade do solo. Isso deveu-se, provavelmente, ao porte ereto de ambas espécies. A partir do ciclo 2010/2011 pôde-se verificar uma tendência da leguminosa feijão-de-porco, devido ao seu porte rasteiro e elevado índice de

cobertura da superfície do solo, relacionar uma melhoria da qualidade do solo a um menor valor de perdas de sedimentos (FIGURA 4). Isso se deveu, principalmente, a sua proteção momentânea contra a erosão do solo.

O consórcio do feijão-de-porco com o milho, o qual apresenta crescimento de porte ereto, não foi suficiente para diagnosticar uma melhor qualidade relacionada a uma quantidade significativa muito menor de perdas de água e solo (Figura 4). Mesmo com esse resultado, o consórcio possui tendência de proporcionar uma melhoria na qualidade do solo em subsuperfície ao longo do tempo. Isso é incomparável aos resultados obtidos para o tratamento com solo descoberto. Esse, apresentando elevadas perdas de água e sedimentos em comparação ao consórcio. Fisiologicamente, a espécie feijão-de-porco junto com sua esparsa cobertura da superfície do solo foi a que proporcionou uma melhor proteção contra a degradação provocada pela erosão hídrica num ciclo de cultivo. O acúmulo da matéria orgânica ao longo dos últimos ciclos de cultivo proporcionou uma melhor homogeneidade quanto a esse indicador dentro da avaliação da qualidade do solo (FIGURA 3).

Pela análise do escalonamento multidimensional apresentado na figura 5, pôde-se verificar que as perdas de solo e as perdas de água estão altamente correlacionadas e ambas possuem relação inversa ao IQN e o IQI aditivo (quanto menores as perdas, maiores os índices encontrados). O atributo Macroporosidade do solo apresentou comportamento semelhante ao encontrado pelos índices de qualidade, o que destaca esse atributo como sendo uma resultante da melhoria das condições físicas do solo, reduzindo a erosão hídrica. Uma densidade maior de sistemas de cultivo apresentados nos diferentes ciclos anuais apresentou proximidade às variáveis IQN, IQI aditivo, Macroporosidade e aos menores valores de perdas de água e solo.

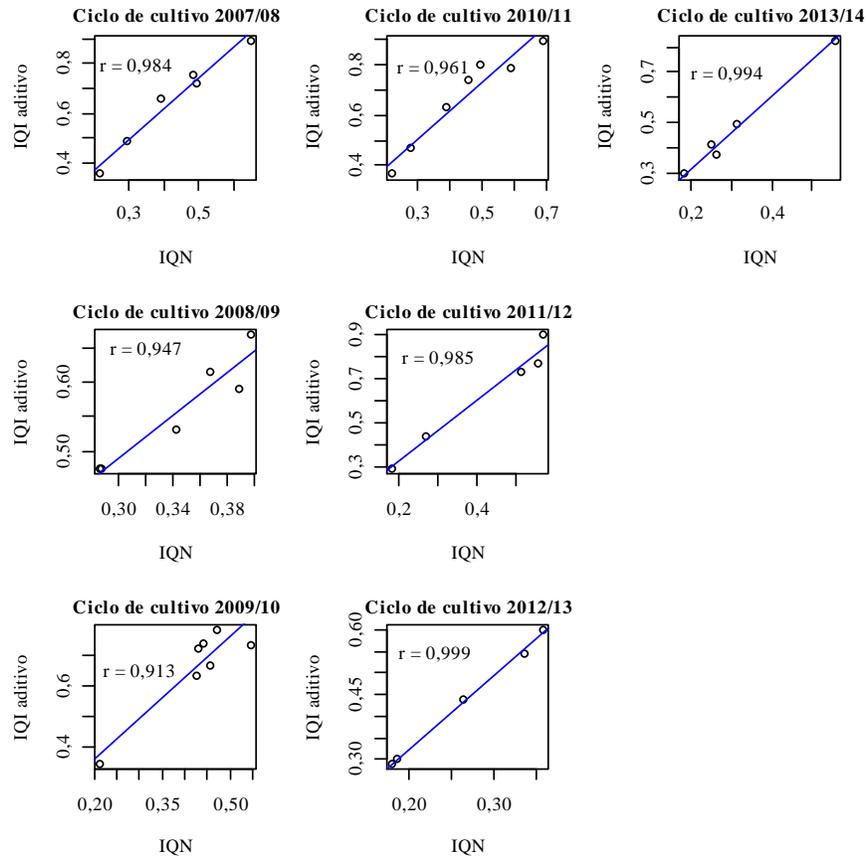


Figura 6 - Relação linear entre os modelos IQN e IQI aditivo

4 CONCLUSÃO

Dentre os dois modelos de indexação da qualidade do solo analisados, o índice de qualidade Nemoro melhor representou o último ciclo de cultivo na área de estudo em comparação ao modelo integrado aditivo. Esse último apresentou maiores valores em comparação ao modelo Nemoro e a partir dele pôde-se visualizar a contribuição de cada indicador selecionado.

Os modelos apresentaram excelente correlação entre si, o que explica o comportamento da qualidade do solo entre os diferentes usos e manejos avaliados durante os ciclos amostrais de cultivo do solo. Houve menores valores de perdas de água e solo em comparação aos maiores índices de qualidade do solo encontrados. A metodologia fuzzy mostrou-se eficaz na predição da composição dos índices pelos diferentes indicadores.

Uma definição precisa do conceito de qualidade do solo perante os conceitos já difundidos de qualidade de água ainda carece como um padrão a ser definido. Dessa forma, outros vieses como a simples qualificação visual ou a comparação entre diferentes metodologias de cálculo em estudo devem servir como base para a avaliação do manejo agrícola do solo.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, C.C.; MELLO, C.R.; MELLO, J.M.; SILVA, A.M.; CURI, N. Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea (IQS_{RA}) na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1608-1619, 2012.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; G. SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; MITCHELL, J. P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. Agriculture, ecosystems & environment, v. 90, n. 1, p. 25-45, 2002.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. Part 1. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986a. p.363-375, 1986.

CARVALHO, W.P.; CARVALHO, G.J.; ABBADE NETO, D.O.; TEIXEIRA, L.G.V. Desempenho agronômico de plantas de cobertura usadas na proteção do solo no período de pousio. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 48, n. 2, p. 157-166, 2013.

CÂNDIDO, B. M.; SILVA, M. L. N., CURI, N., FREITAS, D. A. F; MINCATO, R. L.; FERREIRA, M. M. Métodos de indexação de indicadores na avaliação da qualidade do solo em relação à erosão hídrica. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 589-597, 2015.

DANIELSON, R.E. & SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. 2.ed. Part 1. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.443-461.

DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORA, J.W & JONES, A.J., eds. Methods for assessing soil quality. Madison, Soil Science Society of America, 1996. p.25-37. (SSSA Special Publication, 49)

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 2011. 230p.

FREITAS, D.A.F.; SILVA, M.L.N.; CARDOSO, E.L.; CURI, N. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. *Revista Ciência Agronômica*, v. 43, n. 3, p. 417-428, 2012.

GONG, L.; RAN, Q.; HE, G.; TIYIP, T. A soil quality assessment under different land use types in Keriya river basin, Southern Xinjiang, China. *Soil and Tillage Research*, v. 146, p. 223-229, 2015.

GROHMANN, F. Distribuição do tamanho de poros em três tipos de solo do Estado de São Paulo. *Bragantia*, v.19, p.319-328, 1960.

KARLEN, D.L.; ANDREWS, S.S.; WEINHOLD, B.J.; DORAN, J.W. Soil quality: Humankind's foundation for survival a research editorial by conservation professionals. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 58, n. 4, p. 171-179, 2003.

LIMA, G. C.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F.; CÂNDIDO, B.M.; CURI, NILTON; OLIVEIRA, M. S. Spatialization of soil quality index in the Sub-Basin of Posses, Extrema, Minas Gerais. *R. Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.20, n.1, p. 78-84, 2016.

QI, Y.; DARILEK, J.L.; HUANG, B; ZHAO, Y.; SUN, W.; GU, Z. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, v. 149, n. 3, p. 325-334, 2009.

QIN, M.Z., ZHAO, J. Strategies for sustainable use and characteristics of soil quality changes in urban-rural marginal area: a case study of Kaifeng. *Acta Geogr. Sin.* 55, 545–554 (In Chinese with English abstract), 2000.

RAHMANIPOUR, F.; MARZAIOLI, R.; BAHRAMI, H. A.; FEREDOUNI, Z; BANDARABADI, S.R. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological Indicators*, v. 40, p. 19-26, 2014.

TEIXEIRA, C. M.; CARVALHO, G. J.; SILVA, C. A.; ANDRADE, M. J. B.; PEREIRA, J. M. Liberação de macronutrientes das palhadas de milho solteiro e consorciado com feijão-de-porco sob cultivo de feijão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.497-505, 2010.

XU, M.; LI, Q.; WILSON, G. Degradation of soil physicochemical quality by ephemeral gully erosion on sloping cropland of the hilly Loess Plateau, China. *Soil and Tillage Research*, v. 155, p. 9-18, 2016.