**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Avaliação da qualidade física de solos em pastagens degradadas da Amazônia

Afrânio Ferreira Neves Junior

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas**

**Piracicaba
2005**

Afrânio Ferreira Neves Junior
Engenheiro Agrônomo

Avaliação da qualidade física de solos em pastagens degradadas da Amazônia

Orientador:
Prof. Dr ALVARO PIRES DA SILVA

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas**

Piracicaba
2005

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Neves Junior, Afrânio Ferreira

Avaliação da qualidade física de solos em pastagens degradadas da Amazônia /
Afrânio Ferreira Neves Junior. - - Piracicaba, 2005.
65 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2005.

1. Degradação do solo 2. Física do solo – Qualidade 3. Manejo do solo 4. Pastagens
(Amazônia) 5. Propriedades físicas do solo I. Título

CDD 631.43

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

*... À Ynnara Gabriela: minha eterna
fonte de inspiração e motivação...*

OFEREÇO.

*Aos meus pais por me ensinarem a tornar
sonhos em objetivos, e principalmente
pelo apoio e amor incondicional.*

DEDICO.

Agradecimentos

Ao professor Dr. Alvaro Pires da Silva pela orientação e importante contribuição em minha formação profissional.

À Paôla Andrezza pelo incentivo e apoio fundamental durante a graduação e pós-graduação.

Aos colegas de curso Karina Cavalieri, Cláudia Milene, Tairone Leão e Brivaldo Almeida pela amizade, apoio e inúmeros momentos de descontração.

À Dra. Eleusa Barros pelo incentivo e apoio que me motivaram a estudar fora de Manaus.

Aos amigos Cássio Tormena, Sílvia Imhoff, Paulo Libardi, Neyde Fabíola e Herdjania Lima pelas dicas e observações que contribuíram em minha formação profissional.

Aos moradores da Gloriosa República Batkverna pela amizade, apoio e suporte emocional desde minha chegada à Piracicaba.

Ao professor Hedinaldo Lima pelo incentivo e suporte todas às vezes que foram necessárias.

À Dra. Maria do Rosário pela amizade, apoio e principalmente pelo incentivo.

Ao Dr. Carlos Cerri e Norberto Cornejo pelo material cedido para a realização deste trabalho.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo.

Aos amigos de Campinas: Ricardo, Laura, Marcelo, Walkiria, Amilcar e em especial à Karime Bentes pela hospedagem durante as disciplinas no Instituto Agronômico de Campinas.

À Silvia Zinsly pela paciência e atenção na formatação da dissertação.

Aos amigos Olavo Lima e Cecília Lima pela amizade, carinho e incentivo desde a graduação.

À Augusto Ervilha e Laura Ervilha pela amizade, ajuda e apoio em todos os momentos.

À coordenação do Curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.

Aos demais colegas do Curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.

A todos que não foram citados mais que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
1 INTRODUÇÃO	8
2 DESENVOLVIMENTO.....	10
2.1 Revisão de Literatura.....	10
2.1.2 Qualidade física do solo para o crescimento de plantas.....	10
2.1.3 Integração dos fatores relacionados diretamente ao crescimento de plantas	12
2.1.4 Aplicações do Intervalo Hídrico Ótimo	14
2.1.5 Utilização do Intervalo Hídrico Ótimo no Brasil.....	18
2.2 Material e métodos	24
2.2.1 Área de estudo.....	24
2.2.2 Descrição dos tratamentos	25
2.2.3 Amostragem de solo	26
2.2.4 Curva de retenção da água no solo e curva de resistência à penetração.....	26
2.2.5 Densidade de partículas, permeabilidade ao ar do solo, macro e microporosidade	28
2.2.6 Carbono do solo	30
2.2.7 Estimativa do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)	31
2.2.8 Análise dos dados.....	32
2.3 Resultados e Discussão	34
2.3.1 Análise granulométrica e carbono do solo	34
2.3.2 Densidade do solo (Ds)	35
2.3.3 Resistência do solo à penetração de raízes na capacidade de campo (RP).....	36
2.3.4 Porosidade total do solo (PT).....	39
2.3.5 Macroporosidade do solo	40
2.3.6 Microporosidade do solo	42
2.3.7 Permeabilidade ao ar do solo (Ka).....	43
2.3.8 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).....	44
3 CONCLUSÕES.....	49
REFERÊNCIAS	50

RESUMO

Avaliação da qualidade física de solos em pastagens degradadas da Amazônia.

A região amazônica possui extensas áreas que foram desmatadas e convertidas em sistemas de pastagens. A falta de técnicas na implantação e no manejo destes sistemas resultou em inúmeras áreas de pastagens degradadas. A condução de experimentos de campo visando a reversão deste quadro está sendo avaliada no presente estudo. A área em estudo está localizada na Fazenda Nova Vida, município de Ariquemes, Estado de Rondônia/RO. O solo da fazenda foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo. Os tratamentos utilizados consistiram em dois sistemas de plantio direto (arroz e soja), aplicação de herbicida no controle de invasoras, operação de gradagem e a pastagem controle. O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), a densidade do solo, resistência à penetração, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e permeabilidade do solo ao ar foram determinadas. Não foi verificada diferença significativa entre os tratamentos utilizados. O solo estudado não apresentou restrições físicas ao crescimento de plantas. As variações na estrutura do solo são melhor avaliadas quando os fatores que afetam diretamente o crescimento de plantas são integrados em um único parâmetro. As propriedades físicas determinadas foram menos sensíveis que o IHO às alterações provocadas pelos sistemas de manejo. O IHO possui um grande potencial como índice de qualidade física do solo na avaliação de experimentos que visam a recuperação de pastagens degradadas, pois integra em um único parâmetro os fatores diretamente relacionados ao crescimento de plantas.

Palavras-chave: Amazônia; Pastagens degradadas; Propriedades físicas do solo; Intervalo Hídrico Ótimo

ABSTRACT

Evaluation of the soil physical quality in degraded pastures of the Amazonian

The Brazilian Amazon region has extensive areas that had been deforested and converted into pasture systems. The absence of adequate techniques in implementation and management of these pastures resulted in pasture degradation in several areas. Field experiments with objective of reverting the degradation process are being evaluated in this study. The field site was located at the Nova Vida farm, Ariquemes county, Rondonia State, Brazil. The soil at the farm was classified as “Latossolo Vermelho Amarelo” in agreement with Brazilian classification system. The treatments consisted of two no-tillage systems (rice and soybeans), weed control using herbicides, harrowing and control pasture. The Least Limiting Water Range (LLWR), soil bulk density, soil penetration resistance, macroporosity, microporosity, total porosity and soil air permeability were also evaluated. There was no significant difference between treatments under evaluation. The soil studied did not show physical restrictions to plants growth. Soil structure variations are better evaluated when the factors that affect directly plant growth are integrated in a single parameter. The soil physical properties evaluated were less sensitive than the LLWR to alterations caused by the management systems. The LLWR has a great potential as a soil physical quality index in the evaluation of experiments designed to recover degraded pastures because it integrates in a single parameter the factors directly related to plant growth.

Keywords: Amazon; Degraded pastures; Soil physical properties; Least limiting water range

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia brasileira representa cerca de um terço das florestas tropicais úmidas da Terra e possui quase 300 milhões de floresta densa e 240 milhões de hectares de floresta aberta. Grande parte das áreas desmatada na Amazônia segue uma seqüência de uso da terra que consiste no desmatamento, remoção de madeiras de interesse econômico, introdução de culturas anuais, perenes e formação de pastagens. Pastagens formadas sem nenhum conhecimento agrônomo e animais tratados sem manejo adequado podem ser produtivos nos primeiros anos após o seu estabelecimento, no entanto, perdem a produtividade logo em seguida.

O Estado de Rondônia destaca-se por apresentar umas das maiores taxas de perdas de floresta para a formação de pastagens. O conhecimento básico da dinâmica do solo sob floresta é de grande importância para se entender as mudanças químicas, físicas e biológicas que estes solos sofrem após a substituição da floresta para o sistema de pastagem. A falta de conhecimento técnico durante o processo de semeadura e estabelecimento, o emprego de espécies e cultivares inadequados e a não fertilização do solo levam tais pastagens a um quadro de degradação. Uma pastagem é considerada em estado de degradação quando ocorre diminuição considerável na produtividade potencial para as condições edafoclimáticas e bióticas a que está submetida.

Na Amazônia há uma grande necessidade de se transformar os recursos naturais degradados em áreas produtivas, com potencial econômico sustentável, ajustando a melhoria na qualidade de vida humana à capacidade de suporte dos ecossistemas. Para este propósito, deve-se buscar alternativas de uso e manejo do solo que sejam mais adaptados à realidade local. Sendo assim, as pesquisas devem ser direcionadas a fornecer dados consistentes para a implantação de técnicas de manejo que garantam a sustentabilidade do sistema em longo prazo, mantendo um ambiente funcional no solo para o crescimento de plantas, sem limitações relacionadas à disponibilidade de água, aeração e impedimento mecânico.

Dentro deste contexto, as avaliações feitas em sistemas degradados devem conter parâmetros relacionados à estrutura do solo, sensíveis às mudanças de manejo e que integrem os fatores diretamente relacionados ao crescimento de plantas, assim, tais parâmetros podem fornecer informações sobre o funcionamento do solo e tendências do sistema devido ao manejo utilizado. Entre os parâmetros mais utilizados, podemos citar a densidade do solo, curva de

retenção da água no solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, resistência à penetração, condutividade hidráulica, entre outros.

A realização de estudos que avaliem a sensibilidade destes parâmetros fornece informações úteis na escolha dos parâmetros físicos do solo que serão determinados/estimados, principalmente para avaliar a recuperação de áreas degradadas. A hipótese deste estudo baseia-se na premissa que o processo de degradação apresentado pela pastagem é caracterizado pela degradação física do solo.

Os objetivos deste trabalho foram: i) Avaliar a qualidade física de solos sob pastagem degradada; ii) Identificar os parâmetros físicos do solo mais sensíveis à degradação em áreas sob pastagem degradada.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão de Literatura

2.1.2 Qualidade física do solo para o crescimento de plantas

Qualidade física do solo é a capacidade do solo em promover ao sistema radicular das plantas condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento. As condições favoráveis na zona radicular estão relacionadas com a estrutura do solo e são determinadas pela disponibilidade de água, aeração, temperatura e resistência que o solo oferece à penetração de raízes (EAVIS, 1972; LETEY, 1985; HAMBLIN, 1985). No que diz respeito à funcionalidade, a estrutura do solo ideal é aquela que permite uma grande área de contato entre as raízes e o solo, apresentando espaço poroso suficiente para movimentação de água e difusão de gases, além da resistência à penetração não ser impeditiva ao crescimento de raízes (KOPI; DOUGLAS, 1991).

Alguns estudos associam às condições físicas ideais ao crescimento de plantas uma porosidade de aeração (**PA**) mínima de 10% (GRABLE; SIEMER, 1968; DEXTER, 1988; GLINSKI; LIPIEC, 1990), o valor de 2,0 MPa como um limite de resistência à penetração (**RP**) para o crescimento de raízes (TAYLOR et al., 1966; SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998) e parte aérea das plantas (WEAICH et al., 1992; TARDIEU, 1994), além de uma ampla disponibilidade de água no solo (umidade entre a umidade na capacidade de campo e a umidade no ponto de murcha permanente) .

Dentre os fatores diretamente relacionados com o crescimento vegetal, a água é a principal variável intensamente estudada (LETEY, 1985). Deficiência ou excesso de água limitam o crescimento radicular. A água não causa injúria diretamente às raízes, mas o excesso de água no solo desloca ar do espaço poroso (não capilar), causa deficiência de oxigênio que por sua vez pode reduzir o crescimento e funcionamento, causando a morte das raízes. Uma deficiência severa de água no solo geralmente leva a uma redução ou cessa o crescimento radicular, inibindo a absorção de água e nutrientes (KRAMER; BOYER, 1995). Os fatores que atuam no ambiente radicular estão relacionados em complexas interações, atuando simultaneamente. Uma modificação na umidade do solo promove modificações na aeração e na resistência do solo à penetração de raízes.

De toda água armazenada no solo, apenas uma parte pode ser utilizada pelas plantas. A quantidade de água existente entre a capacidade de campo (θ_{cc}) e o ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) é definida como “água disponível (AD)” (VIEHMEYER; HENDRICKSON, 1927). Em valores potenciais, a faixa de AD é utilizada entre o potencial mátrico de 0,01 MPa (θ_{cc}) e 1,5 MPa (θ_{pmp}). O crescimento vegetal, além da disponibilidade de água, também é diretamente afetado pela resistência à penetração (RP). A RP refere-se a dificuldade que uma raiz experimenta ao crescer através de camadas densas e compactadas, ou a dificuldade que uma plântula encontra ao emergir através da superfície do solo. O valor de 2,0 MPa tem sido adotado em trabalhos como impeditivo para o crescimento de plantas (TAYLOR et al., 1966; SILVA et al., 1994; TARDIEU, 1994).

A taxa de elongação radicular é consideravelmente afetada pelo acréscimo na resistência à penetração. Entretanto, não afeta significativamente o dispêndio de energia requerido pela planta para o crescimento radicular (DEXTER, 1988). O crescimento das raízes pode causar a deformação do solo numa zona próxima à ponta das raízes e a pressão exercida contra as partículas e/ou agregados deve ser suficiente para propiciar a penetração e o alongamento das raízes (BENNIE, 1996).

Valores excessivos de RP podem influenciar o crescimento das raízes em comprimento e diâmetro (MEROTTO; MUNDSTOCK, 1999) e na direção preferencial do crescimento radicular (IIJIMA; KONO, 1991). A resistência à penetração é sensivelmente influenciada pela umidade e pela condição estrutural do solo (HAMBLIN, 1985). O crescimento radicular é uma resposta contínua do ambiente físico do solo (BETZ et al. 1998). Pesquisas revelam que as raízes parecem dispor de mecanismos de detecção das condições físicas do solo, enviando sinais à parte aérea que controlam o crescimento e a expansão foliar (MASLE; PASSIOURA, 1987; PASSIOURA; GARDNER, 1990; DAVIES; ZHANG, 1991).

O crescimento radicular tem sido relacionado como um indicador mais sensível às alterações (perturbações) no solo quando comparado à sensibilidade da parte aérea de plantas (SINGER, 1981; HEILMAN, 1981). O processo de desvio de um obstáculo físico pode ser crítico para sobrevivência e performance da planta, especialmente em ambientes rochosos ou quando o solo está compactado (FALIK et al. 2005) Há estudos mostrando que solos excessivamente porosos são prejudiciais à absorção de água e nutrientes pelas raízes, devido ao menor contato

solo/raiz, provocando também menor desenvolvimento das plantas (KOOISTRA et al., 1992; HÅKANSSON et al., 1998).

A avaliação da qualidade física do solo envolve a obtenção de dados de difícil aquisição com dispêndio de tempo e recursos para serem determinados. Os estudos são baseados em análises quantitativas de propriedades isoladas. Entretanto, é a interação destes aspectos quantitativos que determinam a qualidade do solo. As propriedades físicas do solo são importantes para o crescimento de plantas e são frequentemente relacionadas ao conteúdo de água, oxigênio, temperatura e resistência à penetração. Estes são fatores físicos do solo que influenciam diretamente o crescimento de plantas, pois determinam as taxas dos processos fisiológicos, ligados com o crescimento radicular, com a fotossíntese e com o crescimento foliar.

O crescimento radicular de plantas de ervilha foi observado por Eavis (1972), onde as plantas eram submetidas a três densidades e seis tensões, num solo franco arenoso. Neste estudo, Eavis (1972) procurou avaliar os efeitos isolados das propriedades do solo. O autor conseguiu demonstrar como as propriedades físicas do solo atuam de forma diferenciada no crescimento de plantas, submetidas a umidades e densidades diferentes. O solo, quando úmido e com baixo valor de densidade, apresentou a aeração como fator limitante ao crescimento de plantas. Quando este mesmo solo encontrava-se seco, a principal limitação ao crescimento de plantas encontrado foi o estresse hídrico. Com o aumento da densidade do solo, a resistência do solo à penetração passou a ser um fator expressivo na limitação ao crescimento de plantas.

O crescimento de raízes de milho, submetidos a uma faixa ideal de tensão de água para o crescimento de plantas baseada na curva de retenção de água no solo, foi estudado por Phene e Beale (1976). Os resultados obtidos assemelham-se aos encontrados por Eavis (1972). Quando o solo encontrava-se com altos valores de umidade, a aeração foi o fator limitante ao crescimento radicular e, com baixos valores de umidade este fator foi substituído pela resistência do solo à penetração. O estudo ainda revelou que a faixa ideal de tensão de água para o crescimento de plantas diminuía com o aumento da densidade do solo.

2.1.3 Integração dos fatores relacionados diretamente ao crescimento de plantas

A partir da contribuição de Eavis (1972) e Phene e Beale (1976) na distinção dos fatores relacionados ao crescimento de plantas, Letey (1985) reuniu em um único parâmetro as

limitações relacionadas ao crescimento de plantas (conteúdo de água, aeração e resistência à penetração) e definiu como “*Non-Limiting Water Range (NLWR)*”. O NLWR, intervalo hídrico não-limitante, é um parâmetro que descreve uma faixa de água e incorpora limitações do conteúdo de água no crescimento de plantas relacionadas à aeração, resistência à penetração e água disponível. Os limites da faixa de água, mencionados por Letey (1985), consideravam conteúdos de água associados à capacidade de campo e ponto de murcha permanente, bem como a resistência do solo à penetração e aeração na qual o crescimento de plantas poderia cessar ou ser dramaticamente reduzido (SILVA et al., 1994).

Em 1994, Silva et al. redefiniram e quantificaram o conceito do NLWR. Neste trabalho o conceito foi definido como “*Least Limiting Water Range (LLWR)*”, faixa ou conteúdo de água na qual são mínimas as limitações para o crescimento de plantas, associadas ao potencial matricial, porosidade de aeração e resistência à penetração. Para Silva et al. (1994) a incorporação dos fatores que afetam diretamente o crescimento de plantas em uma única variável, proporcionou um parâmetro mais sensível às mudanças estruturais do solo (caracterizado pela densidade do solo) do que a água disponível. Este índice deve ser sensível a mudanças no ambiente, respondendo a uma possível degradação estrutural do solo que afete o crescimento de plantas. O conceito do LLWR integra três fatores associados ao crescimento de plantas dentro de uma única variável, desta forma pode ser usado com um índice de qualidade estrutural do solo para produção de plantas (SILVA et al., 1994; SILVA; KAY, 1996; ZOU et al., 2000). Fora da faixa do LLWR as limitações associadas ao crescimento de plantas são mais acentuadas e dentro do LLWR as limitações relacionadas ao crescimento de plantas são menos limitantes. Silva et al. (1994) estabeleceram que o limite superior do LLWR seria definido pela umidade em que a porosidade de aeração inferior é a 10% (θ_{pa}) ou pela umidade na capacidade de campo (θ_{cc}), e o limite inferior definido pela umidade em que a resistência à penetração é o fator restritivo ao crescimento de plantas (θ_{rp}) ou pela umidade no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}).

A curva característica de retenção de água no solo como função de duas variáveis independentes: tensão de água no solo e densidade do solo (D_s) foi estabelecida por Silva et al. (1994). A RP foi estabelecida como função da D_s e da umidade volumétrica do solo (θ_v). A θ_{cc} foi estabelecida em 0,01 MPa e a θ_{pmp} em 1,5 MPa, a água disponível pôde ser definida como função da D_s . O valor de 2 MPa foi estabelecido como limitante ao crescimento radicular. Ao se isolar a θ_v no modelo de RP, definiu-se a umidade em que a RP supera o valor crítico (θ_{rp}),

fixado neste estudo em 2 MPa, como função apenas da D_s . A densidade foi usada como variável de monitoramento neste estudo que apresentou uma descrição detalhada do LLWR com aspectos estatísticos e metodológicos.

Orellana et al. (1996) traduziram o conceito introduzido por Letey, de Non-Limiting Water Range para *Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)*. No Brasil Tormena et al. (1998) introduziram o conceito de IHO, o qual tem sido utilizado como tradução em trabalhos que utilizam esse parâmetro, e será adotado neste trabalho como tradução do LLWR.

A partir do reconhecimento de complexas interações entre os parâmetros físicos do solo, e com a incorporação dos fatores que afetam diretamente o crescimento de plantas, vários trabalhos vêm utilizando o IHO como índice de qualidade estrutural do solo para crescimento de plantas.

2.1.4 Aplicações do Intervalo Hídrico Ótimo

O IHO foi utilizado por Silva e Kay (1996) para avaliar o crescimento de plantas de milho. Neste estudo, o crescimento das plantas foi negativamente correlacionado ao IHO e com a ocorrência da umidade do solo fora dos seus limites. Silva e Kay (1997a) e Kay et al. (1997) demonstraram que o IHO é correlacionado positivamente com o conteúdo de matéria orgânica e negativamente com a densidade e teor de argila dos solos.

Em 1998, Betz et al. utilizaram o IHO para avaliar o impacto do preparo e tráfego de veículos no ambiente radicular, em duas profundidades do solo (5-10 cm e 25-30cm). O limite superior do IHO, no tratamento com cultivo anual e onde não havia tráfego nas entrelinhas, foi definido pela umidade na capacidade de campo enquanto que nos tratamentos sob plantio direto sem tráfego na entrelinhas, e nos demais tratamentos com tráfego nas entrelinhas foi definido pela umidade em que a porosidade de aeração era inferior a 10%. A resistência à penetração atuou como limite inferior nos tratamento onde não foi realizado cultivo e a umidade no ponto de murcha permanente foi o limite inferior dos demais tratamentos. As mudanças do IHO, nos tratamentos com preparo do solo e tráfego, demonstraram que a estrutura do solo tem um controle significativo na qualidade física do ambiente radicular.

Além do IHO, a compressão uniaxial e propriedades hidráulicas do solo foram utilizadas por Carter et al. (1999) para caracterizar a qualidade física de um solo em sistema de cultivo conservacionista comparando-o a um sistema convencional. Os resultados mostraram que o

conteúdo de água disponível às plantas e a umidade no ponto de murcha permanente foram similares entre os dois solos. O conteúdo de água associado com a resistência à penetração de 2 MPa, foi maior no sistema de semeadura direta quando comparado ao sistema de cultivo convencional. O IHO foi muito menor no sistema de semeadura direta em relação ao sistema convencional. Este resultado deve-se ao fato da resistência à penetração superar os 2 MPa em maiores conteúdos de água, devido a maiores densidades do solo na ausência de cultivo.

Nos últimos anos, a necessidade do monitoramento de propriedades do solo relacionadas ao manejo de florestas tem crescido muito. Este crescimento deve-se ao grande interesse em se determinar consequências de práticas de manejo na qualidade destes solos e na sustentabilidade do sistema. A textura e a profundidade do solo são propriedades que mudam pouco através do tempo para um dado solo, por este motivo tais propriedades não são úteis na avaliação dos efeitos do manejo no solo (SCHOENHOLTZ et al., 2000). Os indicadores do solo devem ser sensíveis a variações no manejo, assim pode-se comparar os efeitos de uma prática de manejo no solo através do tempo (DORAN; PARKIN, 1994). A avaliação da qualidade do solo de florestas torna-se uma tarefa difícil quando se escolhe um conjunto de propriedades específicas, tais propriedades tornam-se complexas com muitas variações entre solos de diferentes florestas (SCHOENHOLTZ et al., 2000).

Zou et al. (2000) estudaram a interação entre conteúdo de água, potencial mátrico, resistência do solo e porosidade de aeração em quatro tipos de solos florestais. Os solos possuíam texturas contrastantes e foram submetidos a três níveis de compactação. Para integrar em um único parâmetro os fatores que afetam diretamente o crescimento de plantas eles utilizaram o conceito do IHO. O IHO foi negativamente correlacionado com a densidade do solo em solos de textura média, similar aos resultados encontrado por Silva et al. (1994). O valor de 3 MPa foi utilizado como limite a partir do qual o crescimento radicular é restrito. As conclusões deste estudo foram que o IHO é um potencial indicador da qualidade do solo para manejo sustentável. A variabilidade vertical e horizontal é uma restrição citada por Schoenholtz et al. (2000) ao fazer referência ao uso do IHO como indicador da qualidade física de solos florestais.

Para estudar os efeitos da incorporação de lantana (*Lantana* spp.) ao ambiente físico do solo, Sharma e Bhushan (2001) conduziram um experimento de longo prazo, realizado no campo, em um solo de textura franco-argilo-siltoso (Typic Hapludaf). Os autores observaram diminuição da densidade do solo com a adição de lantana (*Lantana* spp.) ao solo. A D_s da camada de 7,5-

10,5 cm diminuiu em torno de 3-14% e na camada de 15-18 cm diminuiu de 1-6%. A adição de lantana proporcionou um aumento na porosidade de aeração e decréscimo na RP. A θ_{pmp} diminui e a θ_{cc} aumentou progressivamente ao aumento de lantana incorporada ao solo, resultando no aumento da AD e do IHO. O IHO foi de 1,7-3,5 vezes maior em solos com adição de lantana em relação à testemunha e a razão IHO:AD foi 1,7-3,1 vezes maior em relação ao controle. O IHO pareceu ser mais sensível a mudanças no conteúdo de carbono orgânico e melhor correlacionado com rendimento de plantas quando comparado ao conceito de AD.

O IHO foi utilizado por Benjamin et al. (2003) para avaliar mudanças no solo influenciadas pelo sistema de manejo do solo. Os autores avaliaram o rendimento das culturas, em um estudo que incluía como tratamentos a rotação de culturas e diferentes níveis de compactação. As culturas incluídas na rotação foram: trigo (*Triticum aestivum* L.), milho (*Zea mays* L.), milheto (*Panicum miliaceum* L.), girassol (*Helianthus annuus* L.). Os tratamentos de compactação consistiam na passagem das rodas de um trator de 700 kg (0, 2 e 8 passadas). O IHO demonstrou uma menor sensibilidade das plantas de milho às condições do solo quando comparadas as plantas de trigo. Os autores concluíram que o IHO pode ser uma medida útil dos efeitos do manejo no potencial de produtividade do solo. Práticas de manejo que maximizam o IHO podem maximizar o potencial do solo para produção de plantas

Um estudo utilizando amostras de solo indeformadas foi realizado por Wu et al. (2003) com o objetivo de investigar os efeitos de alguns fatores de manejo sobre IHO, na qualidade de indicador de condições físicas do solo. Os resultados observados mostraram que tratamentos com resíduos orgânicos não mudaram significativamente a taxa de difusão de oxigênio (TDO), resistência à penetração (RP), IHO e a condutividade hidráulica saturada (Ks). Os valores médios de RP e TDO não diferiram significativamente nos sistemas avaliados. Solos sob sistema de cultivo orgânico apresentaram um IHO relativamente estreito devido ao menor conteúdo de água retido na capacidade de campo, indicando que a superfície do solo sob este sistema, provavelmente tem poros mais largos. No geral, a variação dos tratamentos teve em termos relativos pouco efeito no IHO, TDO, RP, ou Ks da superfície do solo.

Em 2004, Lapen et al., utilizaram o IHO para avaliar a dinâmica da zona de cultivo, entre diferentes sistemas de cultivo, preparo e tráfego na cultura do milho (*Zea mays* L.). Identificaram o potencial impacto do manejo nas condições físicas do solo durante diferentes estações de crescimento. Os resultados mostraram que os solos não submetidos ao preparo convencional

apresentaram menor porosidade de aeração e concentração de oxigênio (valores médios) quando comparados com os tratamentos em que houve preparo convencional do solo. Os efeitos do tráfego nas características do solo foram mais evidentes nos tratamentos sem preparo convencional do solo, estes solos apresentaram baixa porosidade de aeração e concentração de oxigênio durante os dois anos de condução do estudo. Em relação ao estabelecimento e produção de milho, baixa porosidade de aeração foi relacionada a um baixo rendimento e estabelecimento das plantas. No geral, solos com preparo convencional e com menor tráfego de máquinas apresentaram condições de aeração mais favoráveis e, conseqüentemente maior rendimento e população de plantas. Solos submetidos ao tráfego e com sucessivos plantios de milho possuem mais riscos de apresentarem limitações relacionadas à aeração.

Em 2005, Kay et al. realizaram um estudo com o objetivo de determinar se as taxas de trocas gasosas, acumulação de biomassa (parte aérea e sistema radicular), morfologia do sistema radicular e desenvolvimento de plantas de milho variam entre solos dentro de conteúdos de água considerados ótimos. As características do sistema radicular e da parte aérea variam com a aeração do solo. As propriedades do solo na zona radicular, particularmente compactação e conteúdo de água, são mais variáveis espacialmente no campo. Isto pode levar a condições limitantes de diferentes magnitudes em partes diferentes do sistema radicular, resultando em sinalizações múltiplas (TARDIEU, 1994) e modificações da parte aérea (MASLE, 1998; MONTAGU et al., 2001). As taxas de trocas gasosas, acumulação de biomassa, morfologia do sistema radicular e desenvolvimento de plantas variaram com o tipo de solo e grau de compactação dentro de conteúdos de água considerados ótimos. Plantas cultivadas em solos com maior conteúdo de argila exibiram grande diminuição do sistema radicular e parte aérea quando comparadas a plantas cultivadas em solos de textura franca. Condições adversas encontradas pelas raízes resultaram em mudanças concomitantes nas características da parte aérea das plantas, uma vez que uma diminuição crítica do sistema radicular tenha ocorrido. O IHO não foi apropriado para avaliar se as características da parte aérea e do sistema radicular são similares, em solos com diferenças estruturais, quando estes solos encontram-se dentro de seus conteúdos de umidade ótimos. O IHO pode exibir um valor igual a zero quando há a persistência de um ou mais fatores limitantes dentro do conteúdo de umidade ótimo. A identificação desses fatores limitantes e o desenvolvimento de estratégias para remover essas limitações têm importantes

ramificações para melhorar a qualidade física dos solos para produção de plantas e, desse modo aumentar a produtividade.

Para melhor entender o efeito da compactação no crescimento de plântulas de espécies florestais, Siegel-Issem et al., (2005) criaram diferentes níveis de densidade e umidade em um experimento conduzido em casa de vegetação. Os resultados deste estudo mostraram que plantas crescendo em solos com baixos valores de densidade podem explorar uma ampla faixa de umidade sem encontrar restrições. No geral, a biomassa da parte aérea de plântulas que cresceram dentro dos limites do IHO foi maior do que a biomassa das plântulas que cresceram fora (interação espécies/tipos de solo). Os autores concluíram que o IHO tem um potencial como indicador da qualidade do solo, no entanto, as respostas das plântulas nem sempre foram associadas a ele. A combinação de informações desta natureza com modelos, tais como o IHO, poderá melhorar a habilidade de prever potenciais perdas devido à compactação em diferentes combinações de espécies de plantas e tipos de solo.

2.1.5 Utilização do Intervalo Hídrico Ótimo no Brasil

A primeira quantificação do IHO no Brasil foi realizada por Tormena et al. (1988) caracterizando-o em um Latossolo Roxo, cultivado com milho (*Zea mays* L.) em sistema de plantio direto. As funções utilizadas permitiram descrever adequadamente o conceito do IHO, mostrando-se mais sensível às variações da estrutura do solo do que a água disponível. A resistência à penetração e a porosidade de aeração foram fortemente influenciadas pela densidade do solo. A RP representou o limite inferior do IHO em 85% das amostras e a umidade na capacidade de campo representou o limite superior em 97% das amostras.

O IHO pode ser expresso em termos de potencial matricial ao invés do uso da umidade. Neste contexto, Tormena et al. (1999) quantificaram o “Intervalo Ótimo Potencial da Água no Solo (IOP)” em um Latossolo Roxo, demonstrando seu potencial no manejo do solo e da água na agricultura irrigada. O resultados mostraram que o IOP foi inversamente relacionado à densidade do solo. Devido a variabilidade da estrutura do solo, o manejo da água em agricultura irrigada, que visa produções ótimas das culturas, deve levar em conta os fatores incorporados ao IOP além dos limites convencionais da faixa de disponibilidade de água.

Para avaliar o efeito dos sistemas de cultivo (preparo convencional e sem preparo) sobre o IHO, Tormena et al. (1999) utilizaram um Latossolo cultivado com milho (*Zea mays* L. cv. Cargil 701). Os resultados mostraram que o IHO foi maior no cultivo convencional e foi negativamente relacionado com a densidade do solo para valores acima de 1.02 g.cm^{-3} . A RP determinou o limite inferior do IHO em 89% das amostras no cultivo sem preparo e 46% das amostras no cultivo convencional. A θ_{pa} não representou uma limitação do IHO para ambos os sistemas de cultivo estudados. Klein e Libardi (2000), trabalhando em uma área de sequeiro (área cultivada com duas culturas anuais, uma no período chuvoso e outra no período seco), obtiveram resultados semelhantes relacionados a θ_{pa} .

A pressão de preconsolidação foi relacionada com o IHO por Imhoff et al. (2001). Os autores determinaram valores de pressões críticas (P_{cr}) que podem ser aplicados ao solo sem restringir o crescimento de plantas ou provocar compactação adicional. A informação do IHO e da pressão de preconsolidação permite definir um novo indicador, a pressão crítica para o crescimento de plantas.

Em 2002, Silva et al. determinaram o IHO em solos do Rio Grande do Sul sob sistema de plantio direto. Foram coletadas amostras indeformadas em duas profundidades (1-4 e 10-14cm) em três solos (Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico Arênico, Latossolo Vermelho Distrófico e um Latossolo Vermelho Distroférrico). Nesta área foram identificados e selecionados três estados de compactação provocados pelo sistema de cultivo e pelo tráfego de implementos agrícolas. O IHO foi determinado para cada amostra de solo coletada conforme o método proposto por Silva et al. (1994). No Argissolo, a partir da D_s de $1,50 \text{ g.cm}^{-3}$, a umidade em que a porosidade de aeração é inferior a 10% (θ_{pa}) foi o limite superior do IHO. Em valores de D_s inferiores a este valor o limite inferior do IHO foi a umidade próxima ao ponto de murcha permanente, ou seja, a RP não provocou restrições ao crescimento das plantas. A densidade crítica do solo (D_{sc}) foi encontrada próxima a $1,80 \text{ g.cm}^{-3}$, este valor representa o limite crítico, onde o solo não mais apresentou condições favoráveis ao desenvolvimento de plantas. No Latossolo Vermelho Distrófico a θ_{pa} provocou restrições ao desenvolvimento de plantas quando a densidade do solo encontrava-se próxima ao valor considerado crítico ($1,40 \text{ g.cm}^{-3}$). Em menores valores de D_s , o limite superior do IHO foi a umidade retida na capacidade de campo (θ_{cc}). Até a D_s de $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$, o limite inferior do IHO foi a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}). A partir de $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$ a RP começou a provocar restrições ao crescimento das plantas.

No Latossolo Vermelho Distroférrico, a D_s a partir de $1,2 \text{ g.cm}^{-3}$ a θ_{rp} passou a ser o limite inferior do IHO e a θ_{pa} passa a ser o limite superior. A D_{sc} encontrada para este solo foi próximo de $1,40 \text{ g.cm}^{-3}$. No geral, os resultados obtidos para os três tipos de solo, mostraram que o IHO foi negativamente correlacionado com a D_s , ou seja, o IHO diminuiu com o aumento da D_s . Estes resultados estão de acordo com o resultados obtidos por Letey, 1985; Silva e Kay 1997a; Kay et al. 1997.

Um estudo foi conduzido por Sequinatto et al. (2002) para verificar a influência dos sistemas de preparo do solo na RP e na umidade do solo durante o ciclo do feijoeiro. Além disso, determinaram a quantidade de dias em que as plantas ficaram fora do IHO. Os sistemas de preparo adotados foram: plantio direto, preparo convencional e preparo reduzido. Foram realizadas seis irrigações no período de pleno florescimento e formação de vagens, resultando em 84,86 mm de água aplicada. A D_s encontrada no sistema de plantio convencional, entre 0-10cm, esteve na faixa de 1,44 a $1,52 \text{ g.cm}^{-3}$. Enquanto que no sistema de plantio direto, na mesma profundidade, esteve na faixa de 1,52 a $1,72 \text{ g.cm}^{-3}$. O período em que o feijoeiro permaneceu fora do IHO foi de 18 dias para o sistema de plantio direto, 19 dias para o plantio convencional e 13 dias para o plantio reduzido. Os autores não constatarem diferenças significativas nos valores de produtividade entre os tratamentos utilizados.

O IHO foi relacionado com a produtividade de grãos de arroz de sequeiro (cv. Caiapó) em um Latossolo Vermelho (textura média) por Beutler et al. (2004). Os tratamentos utilizados consistiram em diferentes números de passadas de um trator sobre superfície do solo (0, 1, 2, 4 e 6 passadas). Foram coletadas amostras nas camadas de 2,0 - 5,0 -7,0 -10 e 18 cm de profundidade. O IHO foi reduzido a partir da densidade de $1,30 \text{ g.cm}^{-3}$ pela resistência do solo à penetração. O decréscimo na produção do arroz aconteceu a partir de 1,82 MPa. A densidade crítica à produtividade do arroz de sequeiro foi a partir de $1,62 \text{ g.cm}^{-3}$. Duas passadas de uma máquina de 11 Mg sobre o solo reduziu a produtividade do arroz de sequeiro em 66%.

O IHO foi utilizado por Araújo et al. (2004) para avaliar a qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico. A área avaliada foi cultivada com culturas anuais sob preparo convencional do solo (arado de discos e grade niveladora). Uma área de mata nativa, classificada como Floresta Estacional semidecidual, foi utilizada como referência. Os resultados mostraram que a curva de RP do solo foi significativamente influenciada pelo uso do solo, evidenciada pelos maiores valores de RP com o secamento do solo na área cultivada. O IHO foi menor no solo

cultivado, uma vez que a θ_{rp} e a θ_{pa} determinaram os limites, inferior e superior, de água disponível com o aumento da densidade do solo. No solo de referência o IHO foi igual a água disponível, com os limites determinados pela capacidade de campo e pelo ponto de murcha permanente.

Em 2005a, Leão et al., avaliaram a qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico sob um sistema de pastejo contínuo, cultivado com a espécie *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk (com e sem adubação de manutenção) e sob um sistema de pastejo rotacionado, cultivado com a espécie *Panicum maximum* cv. Tanzânia (em dois níveis de resíduo pós pastejo) utilizando o IHO como índice de qualidade estrutural do solo. Os resultados observados indicaram que os piquetes no sistema de pastejo contínuo, com adubação de manutenção (**Cc**) e sem adubação de manutenção (**Cs**), apresentaram condições semelhantes no que diz respeito aos valores de D_s e ao IHO. Comparou-se o tratamento Cs e o sistema de pastejo com resíduo de 2,0-2,5 t ha⁻¹ MST (**R1**). O R1 apresentou condições físicas do solo para crescimento de plantas muito inferiores ao Cs. O sistema de pastejo rotacionado com resíduo de 3,0-3,5 t. ha⁻¹ MST (**R2**) também apresentou condições físicas do solo inferiores à do tratamento Cs. As condições físicas do solo, avaliadas pelo IHO, mostraram-se mais restritivas ao crescimento das plantas no sistema de pastejo rotacionado que no sistema de pastejo contínuo, influenciada pela maior taxa de lotação animal.

A avaliação do IHO como um potencial indicador de mudanças na qualidade física do solo foi realizada por Leão et al. (2005b). Esta avaliação foi feita para camadas superficiais do solo (0-5 cm) após a conversão do Cerrado em pastagem. Os tratamentos consistiram no Cerrado nativo (CN), pastagem de curta duração (PCD) e pastagem contínua (PC). O tratamento PCD apresentou maior restrição para o crescimento de raízes. Enquanto que o tratamento PC apresentou uma faixa de densidade do solo abaixo da densidade crítica (valor de densidade do solo onde o IHO é igual a zero), dessa forma, sua restrição ao crescimento do sistema radicular foi relativamente moderada. No tratamento CN, o potencial à restrição do crescimento radicular foi mínimo. A compactação do solo aumentou com o aumento da taxa de lotação animal, seguindo a seguinte sequência: CN<PC<PCD. O IHO mostrou-se como um indicador bastante útil da qualidade física de solos do Cerrado brasileiro, sendo sensível às alterações das propriedades físicas do solo em camadas superficiais.

A funcionalidade do conceito do IHO têm levado pesquisadores a empregar sua metodologia em trabalhos que buscam a avaliação da qualidade estrutural do solo. Entretanto, a inexistência de uma metodologia simplificada para a quantificação do IHO tem restringido o uso desta técnica entre pesquisadores e técnicos. Em vista desta dificuldade, Leão e Silva (2005) criaram algoritmos, em planilha do Microsoft Excel[®] e uma rotina no programa “*Statistical Analysis System – SAS*” (LEÃO et al. 2005c), para facilitar e popularizar o uso deste índice considerado como indicador da qualidade estrutural de solos. No primeiro trabalho, Leão e Silva (2005) utilizaram procedimentos e técnicas numéricas de otimização relativamente simples, utilizando procedimentos de regressão não-linear que produziram resultados confiáveis quando comparados com aqueles encontrados em literatura. Para utilização desta metodologia, é necessária a determinação da curva de retenção da água no solo de maneira que se possa gerar os dados de potencial de água no solo (ψ) e conteúdo volumétrico de água no solo (θ_v), curva de resistência do solo à penetração (RP) e densidade do solo (D_s). Estes dados são necessários para a planilha de entrada utilizada nesta metodologia para quantificação do IHO. Os gráficos característicos do IHO, resultantes dos procedimentos gerados por este algoritmo em planilha do Excel[®], são exibidos na própria planilha. O algoritmo descrito neste trabalho apresenta-se como uma alternativa para pesquisadores e técnicos que necessitam utilizar o IHO de uma forma mais prática, sem que haja a necessidade de aprofundamento nos processos numéricos e estatísticos que o compõem.

No segundo trabalho, Leão et al. (2005c) descreveram um algoritmo executado no programa SAS (Statistical Analysis System Institute, 1991) para calcular o IHO a partir de dados de densidade do solo, conteúdo volumétrico de água, potencial da água no solo e resistência à penetração. Este estudo apresenta uma descrição que abrange a técnica de regressão não-linear além de detalhar a teoria envolvida neste tipo de análise estatística. A visualização e interpretação dos resultados do IHO são otimizadas pela parte gráfica gerada no procedimento, pois além da descrição estatística envolvida na construção da rotina, o processo gera um gráfico do IHO e fornece o valor da densidade crítica do solo que é representada por uma linha vertical no gráfico. Para validar o algoritmo foram utilizados cinco solos de texturas contrastantes, sob diferentes usos e manejos, gerando um total de sete tratamentos. Os resultados indicaram que este algoritmo produz resultados confiáveis sendo uma ferramenta estatística eficiente para a quantificação do IHO. Outra vantagem é que o algoritmo pode ser modificado ou adaptado para outras rotinas de

softwares ou linguagens de programação de acordo com a disponibilidade ou condições experimentais do usuário.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada na fazenda Nova Vida ($10^{\circ} 10' 05''\text{S}$; e $62^{\circ} 49' 27''\text{O}$), município de Ariquemes (km 472 da BR-364), a aproximadamente 250 km ao sul de Porto Velho, Estado de Rondônia/RO (Figura 1). O clima da região é tropical úmido, do tipo Ami segundo a classificação de Köppen, com estação seca de junho a setembro. A precipitação média anual é de 2200 mm com temperatura anual média de $25,5^{\circ}\text{C}$ (BASTOS; DINIZ, 1982). O solo da área do experimento foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo (EMBRAPA, 1999).

Figura 1 - Mapa de localização da Fazenda Nova Vida, Estado de Rondônia/RO, Amazônia, Brasil. (CERRI et. al., 2004)

A fazenda Nova Vida possui uma área de 22 000 hectares distribuídos entre floresta nativa e pastagens com diferentes idades. De acordo com o projeto RADAMBRASIL (1978), a vegetação natural predominante na área é classificada como floresta aberta úmida. O sistema de pastagem foi convertido diretamente da floresta nativa nos seguintes anos: 1989, 1987, 1983, 1979, 1972, 1951 e 1911 (Figura 2). O sistema de pastagem utilizado neste trabalho compreende o estabelecido em 1983. A taxa de lotação das pastagens da fazenda Nova Vida nunca foi superior a $1,5$ cabeças ha^{-1} . Segundo o histórico da propriedade, o processo de conversão da floresta em pastagem seguiu a seguinte ordem: retirada da madeira de importância econômica, derrubada de árvores seguida de queima, semeadura da *Brachiaria brizantha* por avião e controle de ervas daninhas e arbustos, dois anos após o estabelecimento da pastagem, utilizando fogo.

Figura 2 - Mapa da Fazenda Nova Vida, esquema de distribuição das áreas de floresta nativa e pastagens criadas entre 1911 e 1989. (CERRI et al., 2004)

2.2.2 Descrição dos tratamentos

Para realização deste estudo, foi instalado um experimento no segundo semestre de 2001, compreendendo uma área de 3 hectares cultivados com *Brachiaria brizantha*, plantada em 1983 logo após a retirada da floresta nativa. Os tratamentos foram instalados em 4 parcelas (40 x 40 metros) contendo 4 blocos com 5 tratamentos, num total de 4 repetições por tratamento.

Neste experimento, foram empregados 5 tratamentos visando a recuperação da produtividade da pastagem. A pastagem em estudo tem apresentado um processo de degradação caracterizado pelo declínio da produtividade/vigor e aceleração do grau de infestação de plantas invasoras. Os tratamentos utilizados na tentativa de recuperação da produtividade foram os seguintes:

- 1) **Testemunha (T)**: Pastagem controle (*Brachiaria brizantha*);
- 2) **Herbicida (H)**: Corte manual de invasoras e aplicação de herbicidas Padron no toco das lenhosas e Garlon nas palmáceas. Fertilização com sulfato de amônio, KCl e micronutrientes. Aplicação sequencial do herbicida Tordon (2-4 D) e adubação com sulfato de amônio e KCl.
- 3) **Gradagem + NPK + micronutrientes (G)**: Duas gradagens com grade aradora e uma com grade niveladora (plaina) seguido de plantio da *Brachiaria brizantha* e adubação

com Termofosfato (1020 kg ha^{-1}) que foram incorporados com a grade niveladora. Fertilização com sulfato de amônio, KCl e micronutrientes.

- 4) **Plantio direto de arroz (A):** Aplicação de Glifosato e Gramoxone, plantio direto do arroz e adubação com termofosfato. Adubação de cobertura com sulfato de amônio e micronutrientes. Aplicação dos herbicidas pós-emergentes Gladium e Ally e controle de formigas. Aplicação de adubo foliar sulfato de zinco. Após a colheita do arroz a *Brachiaria brizantha* foi semeada.
- 5) **Plantio direto de soja (S):** Aplicação de Glifosato e Gramoxone, plantio direto da soja e adubação com termofosfato. Adubação de cobertura com KCl, aplicação de herbicida pós-emergente Basagran e controle de formigas. Aplicação de adubo foliar sulfato de manganês. Após a colheita da soja a *Brachiaria brizantha* foi semeada.

2.2.3 Amostragem de solo

O processo de coleta das amostras indeformadas foi realizado com a retirada de anéis volumétricos de aproximadamente 50 mm de diâmetro e 50 mm de altura. A amostragem foi realizada no centro de cada parcela, retirando-se o anel volumétrico no sentido vertical, nas seguintes profundidades: 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm, totalizando 60 amostras (5 tratamentos x 3 profundidades x 4 repetições).

2.2.4 Curva de retenção da água no solo e curva de resistência à penetração

No laboratório as amostras foram preparadas, retirando-se o excesso de solo, de maneira que o solo amostrado ocupasse somente o volume interno do anel. Em seguida, colocou-se no fundo dos anéis uma tela permeável que permite o fluxo de água/ar e impede a perda de solo. Após a realização deste procedimento as amostras indeformadas foram saturadas através da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja até atingir cerca de 2/3 da altura da amostra. Após a saturação as amostras foram divididas em grupos de 4 e submetidas aos seguintes potenciais: 0,01; 0,05; 0,1; e 1,5 MPa através de pressões aplicadas em placas porosas conforme Klute (1986).

Para determinação da RP foi utilizado um penetrômetro desenvolvido no Laboratório de Física do Solo da ESALQ/USP (Figura 3). O penetrômetro é composto por um atuador linear elétrico com motor de passo, um painel de controle de velocidade e direção de deslocamento, uma base metálica para sustentação do conjunto mecânico e da amostra durante o teste e uma célula de carga com capacidade nominal de 20 kg acoplada na extremidade do braço mecânico de um atuador (TORMENA et al., 1988). O penetrômetro apresenta cone com semi-ângulo de 30° e área da base de $0,0266 \text{ cm}^2$ e velocidade de penetração de $1,02 \text{ cm.min}^{-1}$ (BRADFORD, 1980). As medidas de RP foram obtidas através de um sistema automatizado de aquisição de dados e armazenadas num arquivo de texto do próprio sistema. Foram descartadas as medidas feitas na superfície da amostra até 1,0 cm de profundidade, uma vez que a RP aumenta até uma determinada profundidade, e depois tende a tornar-se constante. Segundo Bradford (1986), esta é a profundidade crítica de penetração. A frequência de amostragem corresponde à coleta de um valor de RP a cada 0,6767 segundos, obtendo-se aproximadamente 200 leituras, das quais um valor médio foi utilizado. O sistema de aquisição de dados fornece os valores em kgf, sendo que estes foram convertidos para MPa.

As leituras de resistência à penetração foram realizadas após o equilíbrio em cada um dos potenciais selecionados, totalizando 4 leituras de RP na mesma amostra, conforme o procedimento descrito por Topp et al. (1994). O procedimento adotado para obtenção de 4 leituras consistiu da realização de 3 leituras na borda do anel, distribuídas de forma equidistantes, e uma leitura realizada no centro geométrico da amostra (Figura 3). Este procedimento permite a determinação da curva de retenção da água no solo e a curva de resistência à penetração na mesma amostra, minimizando o número de amostras indeformadas, geralmente necessárias para a construção de tais curvas.

Após a determinação da RP, as amostras retornavam à placa porosa, onde foram umedecidas com uma pequena quantidade de água, suficiente para restabelecer o contato entre as amostras e a placa porosa e, em seguida submetidas ao próximo ponto (potencial seguinte) da curva de retenção. Terminadas as séries de leitura de RP, as amostras foram levadas à estufa onde foram secas a 105°C por 24 horas, para a determinação do conteúdo de água (GARDNER, 1986) e densidade do solo conforme Blake e Hartge (1986).

Figura 3 – Penetrômetro, sistema de aquisição de dados e esquema de distribuição das leituras de resistência à penetração nas amostras indeformadas

2.2.5 Densidade de partículas, permeabilidade ao ar do solo, macro e microporosidade

As determinações de densidade de partículas do solo foram realizadas no Núcleo de Pesquisa em Geoquímica e Geofísica da Litosfera (NUPEGEL) da ESALQ/USP, utilizando-se um picnômetro de gás, modelo ACCUPYC 1330 (Micromeritics Instrument Corporation®). As amostras de solo utilizadas nas análises foram passadas em peneiras de malha de 2mm e secas em estufa a $\pm 60^\circ \text{C}$ por 24 horas. Após a secagem, retirou-se aproximadamente 8 g de solo seco para serem processados no picnômetro. O sistema de leituras do equipamento forneceu 3 valores de densidade de partículas dos quais um valor médio foi adotado para os cálculos da porosidade total e da umidade do solo em que a porosidade de aeração é $\leq 10 \%$.

Para a determinação da permeabilidade ao ar do solo (K_a) foi utilizado um método adaptado de McKenzie e Dexter (1996). O equipamento utilizado para a realização das medidas é composto de um cilindro de aço para GLP (gás liquefeito de petróleo) com volume de 30 L, um transmissor de pressão diferencial modelo 850S - TP1 fabricado pela Vectus (com escala de 0 a 10.000 Pa) e um sistema de aquisição e processamento de dados modelo AqDXY 3.0 fabricado pela Lynx Tecnologia (Figura 4).

Figura 4 - Equipamento utilizado nas medidas de permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo

O princípio da metodologia é baseado na quantificação do decréscimo da pressão no reservatório de ar em função do tempo, o qual é proporcional ao fluxo de ar que atravessa a amostra de solo. Esse decréscimo de pressão em função do tempo é medido em intervalos de um segundo e registrado pelo sistema de aquisição de dados. Os dados registrados são transformados logaritmicamente, de modo que a relação pressão x tempo se torna linear. O coeficiente angular (S) da equação, obtida através desta relação, é composto por variáveis que se mantêm constantes e, pela K_a , portanto, a K_a da amostra pode ser facilmente isolada da inclinação S da reta de ajuste, e assim ser calculada segundo a Equação 1

$$K_a = \frac{\mu LV}{AP_a} \cdot |S| \quad (1)$$

onde, μ , L , V , A e P_a são constantes, S é o coeficiente angular da relação pressão x tempo, e K_a é dada em m^2 . As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se técnicas de regressão

linear e não linear por meio do programa estatístico SAS (Statistical Analysis System Institute, 1991).

Para a estimativa da macroporosidade (poros > 0,03 mm), foi necessário o conhecimento da porosidade total do solo (α), esta foi obtida com a seguinte equação:

$$\alpha = 1 - (D_s/D_p) \quad (2)$$

Onde, D_s é a densidade do solo (g.cm^{-3}) e D_p é a densidade de partículas (g.cm^{-3}) determinada para cada amostra.

Desta forma, a macroporosidade é dada:

$$\text{Macroporosidade (\%)} = (\alpha - \theta_{cc}) * 100 \quad (3)$$

Onde, α é a porosidade total do solo, θ_{cc} é a umidade na capacidade de campo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) e *Macroporosidade* é dada em %.

Para a estimativa da microporosidade (poros < 0,03 mm), utilizou-se os valores de porosidade total do solo (α) e da macroporosidade a partir da seguinte relação:

$$\text{Microporosidade (\%)} = \alpha - \text{Macroporosidade} \quad (4)$$

Onde, α é a porosidade total do solo, *Macroporosidade* é dada em % e *Microporosidade* é dada em %.

2.2.6 Carbono do solo

As análises de carbono do solo foram determinadas no Centro Energia Nuclear de Agricultura (CENA) em Piracicaba /SP, através de combustão no analisador elementar LECO CN 2000, onde, aproximadamente, 300 mg de amostra foram aquecidos a 1400° C em forno fechado (ambiente de O₂ puro) e a quantidade de CO₂ desprendida foi quantificada por uma célula de infravermelho.

2.2.7 Estimativa do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

Para a estimativa do IHO houve a necessidade de se estabelecer os parâmetros que o compõe, desta forma, considera-se:

(i) a umidade do solo na capacidade de campo (θ_{cc} , na tensão de 0,01 MPa) (HAISE et al., 1955);

(ii) a umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{pmp} , na tensão de 1,5 MPa) (RICHARDS; WEAVER, 1944);

(iii) a umidade do solo em que a porosidade de aeração é $\leq 10\%$ (θ_{pa}) (GRABLE; SIEMER, 1968), calculada como $[(1-D_s/D_p) - 0,1]$, onde os valores de D_p foram medidos para cada uma das amostras utilizando o picnômetro de gás citado anteriormente;

(iv) a umidade do solo em que a RP é 2,0 MPa (θ_{rp}) (LIPIEC; HÄKANSSON, 2000). Os itens (i) e (ii) foram determinados a partir da curva de retenção de água no solo, enquanto o item (iv) foi estimado a partir da curva de resistência do solo à penetração. Para cada uma das 60 amostras, a curva de resistência à penetração foi gerada plotando-se um gráfico que relaciona a umidade volumétrica (θ_v), nos quatro potenciais selecionados, com a RP (MPa) medida em cada potencial. Em seguida, através de um procedimento de regressão obteve-se uma função para cada amostra. O ajuste da curva de resistência à penetração foi feito logaritmicamente. Desta forma, a umidade do solo em que a RP é 2,0 MPa foi estimada com a seguinte equação:

$$\theta_{rp} = \text{Exp} (RP_2 - b)/a \quad (5)$$

Onde, a e b são os coeficientes da relação umidade volumétrica(θ_v) e RP (MPa), RP_2 é substituído na equação pelo valor 2.

O IHO foi calculado com a diferença entre o limite superior e o inferior dos conteúdos de água. São quatro as possibilidades no cálculo do IHO, dependendo dos valores dos quatro parâmetros (WU et al., 2003):

(1) Se $(\theta_{pa} \geq \theta_{cc})$ e $(\theta_{rp} \leq \theta_{pmp})$:

$$\mathbf{IHO} = \theta_{cc} - \theta_{pmp};$$

(2) Se $(\theta_{pa} \geq \theta_{cc})$ e $(\theta_{rp} \geq \theta_{pmp})$:

$$\mathbf{IHO} = \theta_{cc} - \theta_{rp};$$

(3) Se $(\theta_{pa} \leq \theta_{cc})$ e $(\theta_{rp} \leq \theta_{pmp})$:

$$\mathbf{IHO} = \theta_{pa} - \theta_{pmp};$$

(4) Se $(\theta_{pa} \leq \theta_{cc})$ e $(\theta_{rp} \geq \theta_{pmp})$:

$$\mathbf{IHO} = \theta_{pa} - \theta_{rp}.$$

2.2.8 Análise dos dados

Todas as análises estatísticas deste trabalho foram feitas utilizando o software SAS (Statistical Analysis System Institute, 1991). Os resultados foram submetidos a análise de variância (two-way Anova), utilizando a rotina do PROC GLM num esquema fatorial segundo Hatcher e Stepanski (1997) e as médias foram comparadas pelo teste (LSD) que considera a diferença mínima de 5%.

Segundo Andrews et al. (1980), os resultados da maioria dos estudos são agrupados em uma série de médias, apesar da maioria dos pesquisadores concordarem que tais resultados são melhores apresentados na forma de gráficos. É importante que os gráficos mostrem medidas de imprecisão (incertezas), tais como Erro Padrão, Intervalo de Confiança (IC), LSD (Least Significant Difference) e HSD (Honestly Significant Difference). A principal vantagem dos gráficos é apresentar uma imagem geral, da natureza e magnitude, das diferenças entre médias de diferentes grupos. O erro padrão e o intervalo de confiança são amplamente utilizados em gráficos para exibir a variabilidade do conjunto de dados que compõem a média. Para apresentação dos resultados deste trabalho, optou-se pela utilização de gráficos contendo as médias das variáveis juntamente com o Intervalo de Confiança (85%), permitindo desta forma a visualização de diferenças significativas entre tratamentos. O IC representa limites onde a média dos valores de um conjunto de dados está contida. Payton et al. (2000) citam a utilização do IC como uma ferramenta útil na interpretação de diferenças significativas entre médias. Assim, o IC (85%) foi calculado para cada média, composta por 4 repetições:

$$IC = x \pm \left| \frac{tS}{\sqrt{n}} \right| \quad (6)$$

Onde x = media, $t_{\alpha/2, n-1}$ (1,925; 3), S = desvio padrão e n = número de observações.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Análise granulométrica e carbono do solo

A análise da distribuição das frações granulométricas mostrou que não houve variação significativa da classe textural entre as profundidades estudadas, observa-se um pequeno aumento no conteúdo de argila em profundidade, o que está de acordo com os resultados obtidos na mesma área por Moraes et al. (1996). A variação do conteúdo de areia em profundidade seguiu um comportamento inverso ao do conteúdo de argila.

Tabela 1 – Características do Latossolo Vermelho Amarelo sob pastagem, localizado na Fazenda Nova Vida, Estado de Rondônia (RO)

Profundidade	g kg ⁻¹			C* (%)	Classe Textural
	Argila	Silte	Areia		
0-10 cm	260	90	650	1,38 (0,15)	Franco argilo arenoso
10-20 cm	300	80	620	0,84 (0,09)	Franco argilo arenoso
20-30 cm	320	120	560	0,63 (0,10)	Franco argilo arenoso

* Valores entre parênteses são os respectivos desvios-padrão.

Em todos os tratamentos o conteúdo de carbono diminuiu com o aumento da profundidade (Tabela 1). Este decréscimo é frequentemente evidenciado no trópico úmido e em particular em solos brasileiros (VOLKOFF; CERRI, 1988; DESJARDINS et al., 1991). A distribuição vertical do carbono é controlada por processos microbiológicos, que são influenciados por características locais específicas, tais como a temperatura (DESJARDINS et al., 1991; ZECH et al., 1997). O conteúdo de carbono entre os tratamentos variou de 0,50 a 1,77 %. Os tratamentos A, H e T apresentaram os maiores conteúdos de carbono (1,0; 0,99 e 0,98 % respectivamente) enquanto que os tratamentos G e S apresentaram os menores (0,91 % e 0,88 %). Diversos estudos realizados nesta mesma área relataram um aumento no conteúdo de carbono após a conversão da floresta em pastagem. Este aumento ocorre de forma gradativa, sendo atribuído ao baixo conteúdo de carbono inicialmente presente no solo, aplicação de fertilizantes e a realização de um manejo cuidadoso que evita o sobrepastejo na área. Kay et al. (1997)

mostraram que o aumento do conteúdo de carbono tem um impacto positivo em diversas propriedades físicas do solo.

2.3.2 Densidade do solo (Ds)

A análise estatística da densidade do solo não revelou diferença significativa (nível de 5%) entre os tratamentos $F(4, 45) = 0,48$; $p = 0,7483$; entre profundidades $F(2, 45) = 2,52$, $p = 0,0919$ e mostrou que não houve interação entre tratamentos e profundidades $F(8, 45) = 0,69$, $p = 0,7002$.

Os valores médios de densidade do solo entre os tratamentos e profundidades são exibidos na Figura 5. A variação de densidade do solo na área foi de 1,35 a 1,67 g.cm^{-3} .

Figura 5 – Valores médios de densidade do solo (g.cm^{-3}) dos tratamentos utilizados na recuperação de um Latossolo Vermelho Amarelo sob sistema de pastagem. Fazenda Nova Vida, Estado de Rondônia (RO). As barras representam o intervalo de confiança (85%). T = testemunha, G = gradagem, H = herbicida, A = plantio direto de arroz e S = plantio direto de soja

Muitos estudos relacionam aumento da densidade do solo em áreas que foram convertidas de floresta para algum outro sistema, seja de pastagem ou sistema agrícola (culturas). Este aumento na densidade do solo é devido à compactação do solo que ocorre pelo tráfego de máquinas e implementos (HAJABASSI et al., 1997; HARTEMINK, 1998; CAVENAGE et al., 1999) ou pelo excessivo pisoteio animal em umidades inadequadas (BAVER et al. 1972).

A comparação dos resultados de densidade do solo (entre profundidades) deste estudo com os dados de Moraes et al. (1996), indicou que os valores de densidade da área de pastagem vêm sofrendo um aumento gradativo nos últimos anos, apesar do ligeiro acréscimo no conteúdo de carbono (MORAES et al., 1996; CERRI et al., 2003). A densidade do solo é negativamente correlacionada com o conteúdo de carbono do solo. Moraes et al. (1996) constataram diferenças significativas nos valores de densidade do solo entre este sistema de pastagem e a floresta utilizada como referência, principalmente nos primeiros 5 centímetros de profundidade.

O fato de não ter havido diferença significativa (nível de 5%) entre os tratamentos utilizados, não implica que o sistema continue e/ou permaneça em processo de degradação, uma vez que a caracterização do processo de degradação está relacionada a uma série de fatores. Os valores de densidade do solo, analisados isoladamente, não fornecem informações necessárias para avaliar o funcionamento do sistema, havendo a necessidade de integrá-la a outros parâmetros ou a utilização de parâmetros mais sensíveis às alterações do solo.

2.3.3 Resistência do solo à penetração de raízes na capacidade de campo (RP)

Para efeito de comparação de resultados, a RP pode ser determinada quando seu conteúdo de água equivale à capacidade de campo (SMITH et al., 1997), desta forma é possível estabelecer valores limitantes e fazer interferências para o crescimento radicular, relacionando-o ao valor crítico de 2 MPa (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998).

A resistência à penetração é uma propriedade física do solo ligada diretamente ao crescimento radicular, comparada à densidade do solo, é uma medida que melhor expressa o potencial de crescimento das raízes por incorporar os efeitos da densidade e umidade do solo. Um solo que apresenta valores elevados de densidade pode não ser limitante ao crescimento de raízes quando se encontra úmido, no entanto, quando este mesmo solo se encontra seco, poderá apresentar condições limitante ao crescimento radicular por apresentar valores elevados de RP.

Isto se deve ao fato da RP incorporar efeitos do conteúdo de água, textura e condição estrutural do solo (TARDIEU, 1994).

A faixa de RP (umidade equivalente à capacidade de campo) obtida neste estudo não ultrapassou o valor de 2 MPa (Figura 6), o qual é considerado como limitante ao crescimento do sistema radicular. O valor de 2,0 MPa tem sido adotado em trabalhos como impeditivo para o crescimento de plantas (TAYLOR et al., 1966; SILVA et al., 1994; TARDIEU, 1994), embora a literatura apresente outros valores para diferentes culturas e diferentes tipos de solo.

A análise estatística realizada para a resistência à penetração revelou diferença significativa entre as profundidades analisadas unicamente para o tratamento S ($p = 0,0114$), o qual foi adotado um sistema de plantio direto de soja anteriormente ao estabelecimento da pastagem. O teste LSD não revelou diferença estatística entre tratamentos ($p > 0,05$). A RP da área estudada concentrou-se na faixa de 0,11 a 0,54 MPa. Os valores médios de RP observados na área são exibidos na Figura 6.

Figura 6 – Valores médios de resistência à penetração (MPa) dos tratamentos utilizados na recuperação de um Latossolo Vermelho Amarelo sob sistema de pastagem. Fazenda Nova Vida, Estado de Rondônia (RO). As barras representam o intervalo de confiança (85%). T = testemunha, G = gradagem, H = Herbicida, A = plantio direto de arroz e S = plantio direto de soja

O sistema radicular das culturas utilizadas nesta área de pastagem, provavelmente não estará sujeito a qualquer tipo de limitação física (impedimento mecânico), quando o solo estiver com umidade próxima à capacidade de campo, devido à faixa de RP encontrada na área. Beutler et al. (2004) descreveram resultados onde a produtividade do arroz de sequeiro (cv. Caiapó) foi reduzida quando a RP encontrava-se próxima a 1,82 MPa. Este valor de RP está muito acima dos valores encontrados nos tratamentos A e S, indicando que as ambas as culturas não encontraram limitações ao crescimento radicular devido à RP.

Analisando os valores de RP encontrados na camada de 0-10cm (Figura 6), observamos valores mais elevados nos tratamentos A e S (ambos sistemas de plantio direto anteriores ao estabelecimento da pastagem). Os valores de RP encontrados em alguns estudos comparativos entre sistemas de plantio direto e convencional, apontam valores mais elevados em sistemas de plantio direto, especialmente nos primeiros 10 cm (EHLERS et al., 1983; RADCLIFFE et al., 1988; HILL, 1990). Este aumento ocorre pela falta de mobilização periódica com equipamentos, tais como arados e grades. A melhor estruturação do solo, devido aos altos níveis de matéria orgânica e a intensa atividade biológica que ocorre nestas camadas, em longo prazo chega a compensar os efeitos da compactação, evitando que níveis críticos às plantas sejam atingidos.

Comparando os valores médios entre profundidades, constatou-se uma pequena diminuição nos valores de RP (0,38 a 0,30 MPa) em profundidade. Este aumento foi seguido de um aumento no conteúdo de argila e diminuição no conteúdo de areia. Nas profundidades onde a variação no conteúdo de areia foi pequena, observou-se pequena variação na RP. Já na profundidade de 20-30 cm, a RP diminuiu significativamente com a diminuição do conteúdo de areia e aumento no conteúdo de argila. Warnars e Eavis (1972) encontraram resultados semelhantes avaliando restrições na elongação do sistema radicular, em solos com textura arenosa, compostos principalmente por areia grossa. A RP depende da distribuição do tamanho e formato de partículas, mineralogia da argila, conteúdo de óxidos amorfos, conteúdo de matéria orgânica e composição química da solução do solo (GERARD, 1965; BYRD; CASSEL, 1980; HORN, 1984). Esta variação, apesar de ser estatisticamente diferente, não implica em grandes modificações ao ambiente radicular uma vez que estamos analisando a RP em condições de umidade relativamente alta. Com o secamento do solo, resultando em uma maior coesão entre as partículas minerais (KAY; ANGERS, 1999), essa pequena variação de RP poderá atuar de forma mais intensa e com maiores implicações ao sistema radicular.

2.3.4 Porosidade total do solo (PT)

A análise estatística da porosidade total do solo não revelou diferença significativa entre os tratamentos e profundidades ($p > 0,05$). A faixa de variação da porosidade total do solo na área foi de 37 a 49%, sendo 41% o valor médio encontrado. Os valores médios da PT entre tratamentos e profundidades são apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Valores médios de porosidade total (%) dos tratamentos utilizados na recuperação de um Latossolo Vermelho Amarelo sob sistema de pastagem. Fazenda Nova Vida, Estado de Rondônia (RO). As barras representam o intervalo de confiança (85%). T = testemunha, G = gradagem, H = herbicida, A = plantio direto de arroz e S = plantio direto de soja

Uma análise geral dos resultados de macroporosidade, microporosidade e da porosidade total do solo revelam que a área estudada encontra-se dentro do conceito de solo ideal, proposto por Kiehl (1979), o qual refere-se ao solo ideal como sendo aquele que contém 1/3 de macroporos (34%) e 2/3 de microporos (66%). Devido à elevada porosidade total presente nos

Latossolos, limitações associadas à porosidade de aeração são raras, exceto em casos de compactação severa, excesso de umidade e elevado conteúdo de argila (LEÃO, 2002).

As modificações relacionadas à aeração do solo foram observadas apenas na macroporosidade, concordando com os resultados obtidos por Da Ros et al. (1997), Cavenage et al. (1999) e Beutler et al. (2001), os quais verificaram que a redução da porosidade total é caracterizada inicialmente pela redução da macroporosidade, propriedade mais sensível quando comparada a microporosidade.

2.3.5 Macroporosidade do solo

A macroporosidade da área variou de 8 a 25 % (Figura 8). Os resultados de macroporosidade foram significativamente maiores na profundidade de 20-30 cm ($p < 0,05$) quando comparado às profundidades anteriores (0-10 e 10-20 cm).

Figura 8 – Valores médios de macroporosidade (%) dos tratamentos utilizados na recuperação de um Latossolo Vermelho Amarelo sob sistema de pastagem. Fazenda Nova Vida, Estado de Rondônia (RO). As barras representam o intervalo de confiança (85%). T = testemunha, G = gradagem, H = herbicida, A = plantio direto de arroz e S = plantio direto de soja

Os macroporos são os caminhos primários para o movimento da água em solos úmidos (BEVAN, 1980) e a redução deles pode restringir a transmissão de água e nutrientes através da zona radicular. Os resultados de macroporosidade não diferiram estatisticamente entre tratamentos ($p > 0,05$), embora todos os tratamentos tenham apresentado uma tendência de aumento em função da profundidade do solo.

Carter et al., (1999) não encontraram diferenças significativas em relação a macroporosidade do solo quando avaliaram a qualidade física do solo de um sistema de cultivo conservacionista.

A camada superficial (0-10 cm) revelou o menor valor de macroporosidade quando comparada às demais profundidades. Os menores valores de macroporosidade geralmente são devido ao processo de compactação da superfície do solo. Os macroporos são, aqui considerados, os poros com tamanho acima de 0,03 mm. Com a compactação do solo esses poros sofrem uma maior redução, com conseqüente aumento dos microporos reduzindo a porosidade total, porém em menor proporção que a macroporosidade (ARAÚJO, 2004).

Segundo Douglas (1986) e Carter (1988), a macroporosidade é um índice bastante útil na avaliação das modificações estruturais do solo. Entretanto, reflete mais a condição do solo no momento e local da amostragem do que uma condição final ou permanente. Em situações onde a macroporosidade é reduzida e a drenagem é impedida, a difusão de oxigênio pode ser prejudicada ocasionando redução no crescimento de plantas (DREWRY et al., 1999).

Os valores de macroporosidade de todos os tratamentos encontram-se dentro da faixa considerada ideal (10 a 16%) por Baver et al. (1972) ou acima de 10 %, valor comumente usado para definir condições limitantes da aeração do solo (GRADWELL, 1965; GRABLE, 1971; CARTER, 1988). Para Hillel (1988), a faixa de espaço aéreo que se torna limitante à respiração radicular e crescimento de plantas encontra-se entre 5 e 20%, sendo 10% considerado um valor médio.

Alguns estudos demonstraram que, quanto maior a densidade de macroporos, mais o solo pode ser explorado pelas plantas (TIMLIM et al., 1994; LONGSDON et al., 1993; SCOOT et al., 1988) aumentando a área de atuação do sistema radicular. Assim, de acordo com os resultados, o solo da área possui uma grande rede de poros disponíveis para o sistema radicular explorar possibilitando um maior desenvolvimento e expansão das raízes devido à menor a probabilidade de encontrarem zonas com valores elevados de RP, uma vez que a taxa de elongação das raízes é

diminuída devido ao aumento da resistência das partículas do solo ao deslocamento (CLARK et al., 2003).

2.3.6 Microporosidade do solo

A microporosidade do solo não foi influenciada pelos tratamentos utilizados, os valores médios não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$). A variação da microporosidade na área foi na ordem de 22 a 36% (Figura 9).

Os valores médios mostraram uma pequena diminuição da microporosidade entre a superfície do solo e as demais camadas, embora a diferença não seja significativa ($p > 0,05$). Silva e Kay (1997) ressaltam que a microporosidade do solo é fortemente influenciada pela textura, teor de carbono orgânico e muito pouco influenciada pelo aumento da densidade do solo, devido ao tráfego de máquinas, implementos, etc.

Figura 9 – Valores médios de macroporosidade (%) dos tratamentos utilizados na recuperação de um Latossolo Vermelho Amarelo sob sistema de pastagem. Fazenda Nova Vida, Estado de Rondônia (RO). As barras representam o intervalo de confiança (85%). T = testemunha, G = gradagem, H = herbicida, A = plantio direto de arroz e S = plantio direto de soja

Segundo Kertzman (1996), o processo de compactação não afeta a porosidade no interior dos microagregados em Latossolos. A compactação afeta os macroporos ao reduzir seu tamanho, contribuindo para aumentar a retenção de água em baixas tensões.

2.3.7 Permeabilidade ao ar do solo (K_a)

Não foi constatada diferença significativa entre os resultados de permeabilidade ao ar do solo, entre tratamentos e profundidades, onde $p > 0,05$. Os valores médios de K_a entre os tratamentos e profundidade são exibidos na Figura 10. A faixa de variação de K_a encontrado na área foi de $5,67 \times 10^{-10}$ a $1,53 \times 10^{-6}$.

A permeabilidade ao ar do solo seguiu a mesma tendência da macroporosidade e porosidade total, apresentando um ligeiro aumento em profundidade. A permeabilidade depende diretamente do número, continuidade, tortuosidade e do quadrado do diâmetro dos poros de aeração, portanto, é sensível à presença de macroporos contínuos e reduz o crescimento de plantas (ARAÚJO, 2004)

Resultados de K_a foram obtidos por McKenzie e Dexter (1996) ao compararem amostras de solo indeformadas (anéis) com resultados obtidos em agregados do solo. Os autores encontraram valores médios de K_a , na ordem de $0,1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ em agregados (umidade equivalente à capacidade de campo).

Os valores de K_a , obtidos na área de pastagem do presente estudo, estão bem acima dos resultados obtidos por McKenzie e Dexter (1996) para agregados, no entanto, os autores afirmam que os resultados obtidos utilizando anéis são sempre maiores do que os obtidos em agregados, provavelmente devido a existência de um maior número de caminhos de fluxo preferenciais ao redor e entre os agregados nos anéis.

Figura 10 – Valores médios de permeabilidade ao ar (m^2) dos tratamentos utilizados na recuperação de um Latossolo Vermelho Amarelo sob sistema de pastagem. Fazenda Nova Vida, Estado de Rondônia (RO). As barras representam o intervalo de confiança (85%). T = testemunha, G = gradagem, H = herbicida, A = plantio direto de arroz e S = plantio direto de soja
* = desvio > média

2.3.8 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

A análise estatística para o IHO não revelou diferença significativa entre os tratamentos, $F(4, 45) = 0,73$; $p = 0,5438$. A comparação do IHO entre profundidades pelo teste LSD exibiu diferença significativa $F(2, 45) = 32,87$, $p < 0,0001$. Não houve interação entre tratamentos e profundidades $F(8, 45) = 1,45$ $p = 0,2022$.

A amplitude do IHO nas profundidades foi de 0,10 a 0,21 $cm^3.cm^{-3}$ (0-10 cm), de 0,11 a 0,14 $cm^3.cm^{-3}$ (10-20 cm) e de 0,08 a 0,21 $cm^3.cm^{-3}$ na profundidade de 20-30 cm.

Os valores médios do Intervalo Hídrico Ótimo entre os tratamentos e profundidades são exibidos na Figura 11.

Figura 11 – Valores médios do Intervalo Hídrico Ótimo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) dos tratamentos utilizados na recuperação de um Latossolo Vermelho Amarelo sob sistema de pastagem. Fazenda Nova Vida, Estado de Rondônia (RO). As barras representam o intervalo de confiança (85%). T = testemunha, G = gradagem, H = herbicida, A = plantio direto de arroz e S = plantio direto de soja

O IHO foi negativamente correlacionado com o conteúdo de argila do solo. Apesar de pequeno, o aumento do conteúdo de argila em profundidade provavelmente contribuiu para reduzir significativamente o IHO ($p < 0,05$). Estes resultados estão de acordo com os que foram descritos por Silva et al. (1994) na caracterização do IHO, Topp et al. (1994) em um programa de avaliação da estrutura de solos canadenses e por Silva e Kay (1997) quando avaliaram a influência de propriedades físicas do solo e práticas de manejo em relação ao IHO. Além do aumento do conteúdo de argila em profundidade, deve-se considerar a diminuição significativa do conteúdo carbono do solo em profundidade, uma vez que o IHO é correlacionado positivamente com o conteúdo de carbono do solo (SILVA; KAY, 1997; SHARMA; BHUSHAN, 2001; ARAÚJO; TORMENA, 2004).

Conforme a Figura 11 (camada de 0-10 cm), os tratamentos G, H e S apresentaram valores de IHO significativamente maiores em relação às camadas inferiores. A diminuição da

densidade do solo, apesar de não significativa, juntamente com valores mais elevados de carbono do solo encontrados nesta profundidade, provavelmente tenha contribuído para elevar os resultados do IHO nesta camada de solo. De acordo com o IHO, as limitações físicas relacionadas à disponibilidade de água, porosidade de aeração e resistência à penetração tornam-se mais acentuadas à medida que o IHO diminui. Kay (1990) observou que quanto menor o IHO maior a probabilidade do sistema radicular encontrar restrições físicas relacionadas ao crescimento. Tormena (1998) observou que os sistemas de manejo que proporcionam um menor valor de IHO expõem as culturas a um maior número de situações de estresse, por excesso ou por falta de água.

Os tratamentos T e A apresentaram os menores valores de IHO (Figura 11) e os valores mais elevados de densidade do solo (Figura 5) na camada na camada de 0-10 cm. Alguns resultados demonstraram que o IHO é negativamente correlacionado com a densidade do solo (TOPP et al., 1994; SILVA et al., 1994; SILVA; KAY 1997). Em alguns casos, a correlação é positiva, sendo assim, o aumento da densidade do solo até um certo valor pode contribuir positivamente com o IHO. Com o aumento da densidade do solo, há uma redução da macroporosidade, resultando em um aumentando do número de poros de diâmetro menor (formação de mesoporos) e a criação de um maior número de partículas disponíveis por unidade de volume de solo, esta combinação contribui para elevar a umidade retida na capacidade de campo. Com o aumento da umidade na capacidade de campo, há uma menor taxa de incremento da resistência à penetração (ZOU et al., 2000), melhorando as condições em relação ao impedimento mecânico e disponibilidade de água para as plantas.

As variações nos resultados do IHO foram mais acentuadas na superfície do solo. O efeito dos tratamentos utilizados na recuperação da pastagem degradada provavelmente foi perdido durante o tempo ou não foi verificado devido à variabilidade dos dados. Isto é evidenciado pela ausência de diferenças significativas entre os tratamentos e a uniformidade das propriedades analisadas. Houve um período de três anos desde o plantio da gramínea (*Brachiaria brizantha*) até a coleta das amostras indeformadas. Durante este tempo, todas as mudanças na estrutura do solo devido aos tratamentos utilizados foram diminuindo e o efeito dos tratamentos manteve-se apenas entre as profundidades estudadas.

O efeito observado entre as profundidades provavelmente é devido ao carbono orgânico do solo, o qual apresentou diminuição significativa em função da profundidade. Uma grande parte dos tratamentos incorporou matéria orgânica ao solo. No tratamento G, a gradagem foi

realizada na área coberta por plantas invasoras, as quais foram incorporadas no solo durante a operação de preparo do solo. No tratamento H, as plantas invasoras foram cortadas manualmente e em seguida o herbicida foi aplicado. A matéria seca das plantas invasoras permaneceu sobre a superfície do solo até plantio da gramínea. Já nos tratamentos A e S, ambos sistemas de plantio direto, a gramínea foi plantada após a colheita das culturas. Desta forma, os restos culturais das culturas utilizadas permaneceram no solo até o plantio da gramínea para formação da pastagem.

Além do carbono proveniente dos tratamentos, foi verificado que com a implantação do sistema de pastagem nesta região, há um aumento do carbono do solo. Este aumento causa uma redução da densidade do solo, aumento na retenção de água, melhoria da estrutura do solo em relação à aeração e agregação. Todas estas modificações estão relacionadas ao IHO, assim, as camadas de solo onde acontecem tais alterações exibem valores de IHO superiores às outras que não apresentaram tais mudanças.

A partir do conceito do IHO, pode-se inferir que a área estudada provavelmente não apresentou limitações para o crescimento de plantas, apesar do sistema de pastagem ter sido caracterizado como degradado. A caracterização do processo de degradação envolve uma série de fatores que atuam simultaneamente, neste contexto, o conceito de degradação é dinâmico e pode ser avaliado por um conjunto de variáveis que agem de maneira associada, sendo que a degradação pode ser reduzida ou agravada pelas práticas de manejo. Na pastagem em estudo o processo de degradação foi caracterizado pelo declínio da produtividade/vigor e aceleração do grau de infestação de plantas invasoras.

De um modo geral, a implantação de sistemas de manejo que promovam o aumento do conteúdo de carbono do solo, diminuição da densidade do solo, além de um aumento na retenção de água e melhore as condições de aeração, estarão associados a melhorias na estrutura do solo. Os sistemas de manejo devem buscar maneiras de fazer com que as melhorias na estrutura do solo permaneçam ao longo dos anos evitando que os efeitos sejam perdidos em cultivos subsequentes.

A utilização de índices que forneçam as informações necessárias para tomada de decisões é de fundamental importância na avaliação de sistemas de manejo. Quanto maior a sensibilidade do índice menor será o tempo necessário para a obtenção de tais informações. A manutenção de experimentos de campo ou mesmo cultivos com diferentes sistemas de manejo requer tempo, tornando-se uma atividade onerosa. A adoção de um índice que integre as limitações relacionadas

ao crescimento de plantas torna-se uma alternativa viável em áreas sob a avaliação de sistemas de manejo.

3 CONCLUSÕES

A avaliação da qualidade física do solo negou a hipótese testada ao demonstrar que a pastagem em estudo não apresentou degradação física do solo. As modificações da estrutura de solos sob sistemas de manejo são melhor avaliadas através de índices que integrem de forma quantitativa os fatores que afetam diretamente o crescimento de plantas. Os resultados obtidos sugerem que o IHO pode ser utilizado para avaliar experimentos visando a recuperação de pastagens degradadas. A tendência dos resultados demonstrou que os melhores sistemas de manejo, empregados na recuperação de áreas degradadas, são aqueles que favorecem a manutenção e/ou aumento da matéria orgânica no solo ao longo do tempo, tais como os sistemas de plantio direto, sistemas de pastagem e tratamentos que envolvam a incorporação de restos culturais.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. C.; SUZUKI, L. E. A. S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 1, p.37-34, 2004.
- ALVES, D. S.; ESCADA, M. I. S.; PEREIRA, J. L. G., SOUZA, C. L. Land use intensification and abandonment in Rondônia, Brazilian Amazonian. **International Journal of Remote Sensing**, Oxford, v. 24, p. 899-903, 2003.
- ANDRADE, R. P. Pastagens na região dos cerrados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PASTAGENS, SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGEM, 1986, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, p. 455-480, v. 8, 1986.
- ANDRADE, R. P.; LEITE, G. C. Pastagens na região dos cerrados. **Informe agropecuário**, Piracicaba, v. 13, n. 153/154, p. 26-39, 1988.
- ARAÚJO, A. G. **Estimativa e classificação da compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas através da modelagem nebulosa**. 2004. 224 p. Tese (Doutorado em Sistemas Digitais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- ARAUJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p.337-345, 2004.
- ARAUJO, Q. R.; COSTA, L. M.; JUCKSCH, I.; FONTES, L. E. F.; REGAZZI, A. J. Alterações nas propriedades físicas de um podzólico vermelho-amarelo da região cacauzeira da Bahia, sob diferentes coberturas vegetais. **Agrotrópica**, Ilhéus, v. 10, p. 69-78, 1998.
- AVILA, M. **The economics of agroforestry systems**. PAIA: Financial and economic analysis of agroforestry systems, Hawaii. 1992. p. 77-94.
- BASTOS, T. X.; DINIZ, T. D. A. S. **Avaliação de clima do Estado de Rondônia para desenvolvimento agrícola**. Belém: Embrapa, CPATU, 1982. 82p. (Boletim de Pesquisa, 44).
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. 4.ed. New York: John Wiley, 1972. 498p
- BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, London, v. 41, p. 341-358, 1990.
- BENJAMIN, J. G.; NIELSON, D. C.; VIGIL, M. F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, p. 137-148, 2003.

BENNIE, A. T. P. Growth and mechanical impedance. In: WASEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. **Plant roots**. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 453-470.

BERNOUX, M. M. Y. **Conteúdo de carbono dos solos da Amazônia ocidental e mudanças decorrentes da conversão da floresta em pastagens**. 1998. 98p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

BERNOUX, M. M. Y.; ARROUAYS, D.; CERRI, C. C, VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk density of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 62, p. 743-749, 1998.

BETZ, C. L.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M.; RANDALL, G.W. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v.62, p.1384-1393, 1998.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M.V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 575-580, 2004.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 167-177, 2001.

BEVAN, K. The Grendon Underwood field drainage experiment. **Institute of Hydrology Report**, Wallingford, v. 65, p. 30, 1980.

BILANSKI, W.K., VARMA R.K. Effect of bulk-density and moisture tension on corn shoot growth. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 19, n. 2, p. 337-340. 1976 .

BLACKWELL, P. S.; RINGROSE-VOASE, A. J.; JAYAWARDANE, N. S.; OLSSON, K. A.; MCKENZIE, D. C.; MASON, W. K. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. **Journal of Soil Science**, London, v. 41, p. 215-228, 1990.

BODDEY, R. M.; R. A. O.; I. M.; Thomas, R. J.; Nutrient cycling and environmental impact of Brachiaria pastures. In: MILES, J. W.; MASS, B. L.; VALLE, C. B. (Ed.). **Brachiaria: biology, agronomy and improvement**. Cali: CIAT; EMBRAPA; CNPG, 1996. p. 53-71.

BONILLA, A. L. C. **Balanco de nitrogênio em microbacias pareadas (Floresta vs. Pastagem) no Estado de Rondônia**. 2005, 69p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

BOONE, F. R. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p.283-324, 1988.

BOONE, F. R.; VEEN, B. W. Mechanisms of crop response to soil compaction. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. VAN. (Ed). **Soil compaction in crop production**, Amsterdam: Elsevier, cap. 11, p. 237-264, 1994.

BOONE, F. R.; WERF, H. M. G. van der; KROESBERGEN B. et al. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage II. Soil conditions and plant growth. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v. 34, n. 2, p. 155 –171, 1986.

BORGES, A. L.; KIEHL, J. C.; SOUZA, L. S. Alteração de propriedades físicas e atividade microbiana de um Latossolo Amarelo álico após o cultivo com fruteiras perenes e mandioca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p.1019-1025, 1999.

BOWEN, H. D.; GARNER, T. H.; VAUGHN, D. H. Advances in soil-plant dynamics. In: _____. (Ed.). **Advances in Soil Dynamics**. cap. 3, p. 256-274. 1994.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 12 rd.ed. New Jersey: Prentice Hall,1999. 881p.

BRADFORD, J. M. The penetration resistance in a soil with well-defined structural units. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 44, p. 601-606, 1980.

BYRD, C. W.; CASSEL, D. K. The effect of sand content upon cone index and selected physical properties. **Soil Science**, Baltimore, v. 129, p.197-204, 1980.

CAMPBELL, D. J.; O'SULLIVAN, M. F. The cone penetrometer in relation to trafficability, compaction, and tillage. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E., (Ed.). **Soil analysis. Physical methods**, New York: Marcel Dekker,1991. p. 399–430.

CARTER, M. R. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 12, p. 37-45, 1998.

CARTER, M. R.; BALL, B. C. Soil porosity. In: Carter, M. R., (Ed.). **Soil sampling and methods of analysis**. Ottawa, ON: Canadian Society of Soil Science, 1993. p. 581–588.

CARTER, M. R.; ANGERS, D. A.; TOPP, G. C. Characterizing equilibrium physical condition near the surface of a fine sandy loam under conservation tillage in a humid climate. **Soil Science**, Baltimore, v. 164, n. 2, p.101-110, 1999.

CASSEL, D. K. Tillage effects on soil bulk density and mechanical impedance. In: UNGER, P. W.; Van DOREN, D. M. (Ed.). **Predicting tillage effects on soil physical properties and processes**. Madison: WI, ASA; SSSA, 1982. p. 45-67. (ASA Spec. Publ, 44).

CAVENAGE, A.; MORAES, M. L. T.; ALVES, M. C.; CARVALHO, M. A. C.; FREITAS, M. L. M.; BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um latossolo vermelho-escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 997-1003, 1999.

CERRI, C. E. P. **Variabilidade espacial e temporal do carbono do solo na conversão de floresta em pastagem na Amazônia Ocidental (Rondônia)**. 2003, 159 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Universidade de São Paulo, 2003.

CERRI, C. E. P.; COLEMAN, K.; JENKINSON, D. S.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R.; CERRI, C. C. Soil carbon dynamics at Nova Vida Ranch, Amazon, Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 67, n. 6, p. 1879-1887, 2003.

CERRI, C. E. P.; COLEMAN, K.; JENKINSON, D. S.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R.; CERRI, C. C. Modeling soil carbon from forest and pasture ecosystems of Amazon, Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 67, p. 1879-1887, 2003.

CERRI, C. E. P.; PAUSTIAN, K.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R. L.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Modeling changes in soil organic matter in Amazon forest to pasture conversion with the Century model. **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, p. 815-832, 2004.

CERRI, C. E. P.; BERNOUX, A.; CHAPLOT, V.; VOLKOFF, B.; VICTORIA, R. L.; MELILLO, J. M.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. C. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, p. 51-68, 2004.

CHAN, K. Y. Bulk Density. In: LAL, R. **Encyclopedia of Soil Science**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 128-130.

CHAN, K. Y.; BOWMAN, A. M.; SMITH, W.; ASHLEY, R. Restoring soil fertility of degraded hardsetting soils in semi-arid areas with different pastures. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v. 41, p. 507-514, 2001.

CHANASYK, D. S.; NAETH, M. A. Grazing impacts on bulk density and soil strength in the foothills fescue grasslands of Alberta, **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75, p. 551-557, 1995.

CLARK, L. J.; WHALLEY, W. R.; BARRACLOUGH, P. B. How do roots penetrate strong soil? **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 255, p. 93-104, 2003.

CORREA, J. C.; REICHARDT, K. Efeito do tempo de uso das pastagens sobre as propriedades de um Latossolo Amarelo da Amazônia Central. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n. 1, p. 107-114, 1995.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Physical properties of a south Brazilian Oxisol as affected by no-tillage and conventional tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 527-535, 2003.

CORSINI, P. C.; FERRAUDO, A. S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em latossolo roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 32, p. 289-298, 1999.

CZYŻYŃ, E. A. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 153-166, 2004.

DA ROS, C. O.; SECCO, D.; FIORIN, J. E.; PETRERE, C.; CADORE, M. A.; PASA, L. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 241-247, 1997.

DAVIES, W. J.; ZHANG, J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 42, p. 55-76, 1991.

DESJARDINS, T.; VOLKOFF, B.; ANDREUX, F.; CERRI, C. C. Distribution du carbone total et de l'isotope ^{13}C dans des sols ferrallitiques du Brésil. **Science du Sol**, Montpellier, v. 29, p.175-187, 1991.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 199-238, 1988.

DEXTER, A. R.; ZOEBISCH, M. A. Degradation, critical limits of soil properties and irreversible. In: LAL, R. **Encyclopedia of Soil Science**, New York: Marcel Dekker, 2001. p. 272-276.

DEXTER, A. R.; ZOEBISCH, M. A. Degradation, Physical. In: **Encyclopedia of Soil Science**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 311-316.

DIAS JUNIOR, M. S.; ESTANISLAU, W. T. Grau de compactação e retenção de água de latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p.45- 51, 1999.

DIEZ, J. A.; POLO, A.; DIAZ-BURGOS, M. A.; CERRI, C. C.; FEIL, B. J.; PICOLLO, M. C. Effect of fallow land, cultivated pasture and abandoned pasture on soil fertility in two deforested Amazonian Regions. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, p. 32-54,1997.

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

DOUGLAS, J. T. Macroporosity and permeability of some soil cores from England and France. **Geoderma**, Amsterdam, v. 37, p. 221-231, 1986.

DREWRY, J. J.; PATON, R. J. Effect of subsoiling on soil physical properties and dry matter production on a Brown Soil in Southland, New Zealand. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Canterbury, v. 43, n. 2, p. 259-268, 2000.

DREWRY, J. J.; LOWE, J. A.; PATON, R. J. Effect of sheep stocking intensity on soil physical properties and dry matter production on a Pallic Soil in Southland. **New Zeland Journal of Agricultural Research**, Canterbury, v. 42, p. 493-499, 1999.

EAVIS, B. W. Soil physical conditions affecting seedling root growth: I. Mechanical impedance, aeration and moisture availability as influenced by bulk density and moisture level in a sandy loam soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 36, p. 613-622, 1972.

EHLERS, W. W.; KOPKE, F.; HESSE, F.; BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 3, p. 261-275, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 1999. 412p.

EVANS, D. D.; KIRKHAM, D. Measurement of the air permeability of soil in situ. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, v. 13, p. 65-73, 1949.

FALIK, O.; REIDES, P.; GERSANI, M.; NOVOPLANSKY, A. Root navigation by self inhibition. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 28, p. 562-569, 2005.

FEARNSIDE, P. M.; BARBOSA, R. I. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 108, p. 147-166, 1998.

FEIGL, B. J.; MELILLO, J.; CERRI, C. C. Changes in the origin and quality of soil organic-matter after pasture introduction in Rondonia (Brazil). **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 175, p. 21-29, 1995.

FERNANDES, S. A. P. **Propriedades do solo na conversão de floresta em pastagem fertilizada e não fertilizada com fósforo na Amazônia (Rondônia)**. 1999. 131p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

GARDNER, W. H. Water content. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2 rd.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. cap. 21, p. 493-544.

GERARD, C. J. The influence of soil moisture, soil texture, drying conditions and exchangeable cations on soil strength. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, v. 29, p. 641-645, 1965.

GLINSKI, J.; LIPIEC, J. **Soil physical conditions and plant roots**. Florida: CRC Press, 1990. 250p.

GOODLAND, R. G. The concept of environmental sustainability. **Annual review of ecology and systematics**, Palo Alto, v. 26, p. 1-25, 1995.

GRABLE, A. R. Effects of compaction on content and trans-mission of air in soils. In: BARNES, K. K.; CARLETON, W. M.; TAYLOR, H. M.; THROCKMORTON, R. I.; Vanden Berg, G. E. (Ed.). **Compaction of agricultural soils**. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Mi: 1971. p. 154-164.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 32, n. 2, p.180-186, 1968.

GRADWELL, M. W. Soil physical conditions of winter and growth of ryegrass plants. **New Zeland Journal of Agricultural Research**, Canterbury, v. 8, p. 238-269, 1965.

GREACEN, E. L.; SANDS, R. Compaction of forest soils: A Review. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 18, p. 163-189, 1980.

HAISE, H. R.; HAAS, H. J.; JENSEN, L. R. Soil moisture studies of some great plains soils. II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage, and minimum point as related to 15- and 26-atmosphere percentage. **Soil Science Society of America Proceedings**, Oxford, v. 34, p. 20-25, 1955.

HABABASSI, M. A.; JALALIAN, A.; KARIMZADEH, H. R. Deforestation effects on soil physical and chemical properties. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 190, p. 301-308, 1997.

HÅKANSSON, I.; STENBERG, M.; RYDBERG, T. Long term experiments with different depths of moldboard plough in Sweden. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 46, p. 209-223, 1998.

HÅKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C.; STEWART, B. A. (Ed.) **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Ration: CRC Press, 1998. p.167-179.

HAMBLIN, A. P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. San Diego, **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, p. 95-158, 1985.

HATCHER, L.; STEPANSKI, E. J. A step-by-step approach to using the SAS System for Univariate and Multivariate Statistics. Cary: SAS Institute. 1997. 552p.

HARTEMINK, A. E. Soil chemical and physical properties as indicators of sustainable land management under sugar cane in Papua New Guinea. **Geoderma**, Amsterdam, v. 85, p. 283-306, 1998.

HARRISON, D. F.; CAMERON, K. C.; McLAREN, R. G. Effects of subsoil loosening on soil physical properties, plant root growth, and pasture yield. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Canterbury, v. 37, p. 559-567, 1994.

HEARD, J. R.; KLADIVKO, E. J.; MANNERING, J. V. Soil macroporosity, hydraulic conductivity and air permeability of silty soil under long-term conservation tillage in Indian. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 1-18, 1988.

HEILMAN, P. Root penetration of Douglas-fir seedlings into compacted soil. **Forest Science**, Washington, v. 2, p. 660-666, 1981.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. London: Academic press, 1998. 413p.

HOULBROOKE, D. J.; THOM, E. R.; CHAPMAN, R.; MCLAY, C. D. A. A study of the effects of soil bulk density on root and shoot growth of different ryegrass lines. **New Zeland Journal of Agricultural Research**, Canterbury, v. 40, p. 429-435, 1997.

ICHIHARA, S. M. **Desmatamento e recuperação de pastagens degradadas na região amazônica: uma nova abordagem através de estudos de projetos**. 2003.106p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

IJIMA, M.; KONO, Y.; YAMAUCHI, A.; PARDALESJUNIOR, J. R. Effects of soil compaction on the development of rice and maize root systems. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 31, n. 3, p. 333-342, 1991.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, 2000.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; DIAS JUNIOR, M. S.; TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 11-18, 2001.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Monitoramento da floresta amazônica por satélites**. Disponível em: http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2003.htm Acesso em 25. ago. 2005.

IVERSEN, B. V.; SCHJØNNING, P.; POULSEN, T. G.; MOULDRUP, P. *In situ*, on-site and laboratory measurements of soil air permeability: Boundary conditions and measurement scale. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, n. 2, p. 97-106, 2001.

JENSEN, C. R.; MOGENSEN, V. O.; POULSEN, H. H.; HENSON, I. E.; AAGOT, S.; HANSEN, E.; ALI, M.; WOLLENWEBER, B. Soil water matric potential rather than water content determines drought responses in field-grown lupin (*Lupinus angustifolius*). **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 25, p. 353-363, 1998.

JOHNSON, C. E.; BAILEY, A. C. Soil compaction. In: CHANCELLOR, W. J. **Advances in soil dynamics**. St. Joseph, Mi: ASAE, 2002. v. 2. p. 1555-1578.

KAY, B. D. Assessing the suitability of different soils for new cropping systems in terms of rates of change in soil structure. In: LARSON, W. E.; BLAKE, G. R.; ALLMARAS, R. R.; VOORHEES, W. B.; GUPTA, S. C. (Ed). **Mechanics and related processes in structured agricultural soils**. Dordrecht: NATO. cap. 17, p. 223-232. (Series in Applied Sciences), 1989.

KAY, B. D. Rates of change of soil structure under different cropping systems. In: STEWART, B. A. **Advances in Soil Science**; New York: Springer-Verlag, Heidelberg. 1990. v. 12, p. 1-52.

KAY, B. D.; ANGERS, D. A. Soil structure. In: A. SUMNER, M. E., (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 1999. p. 229-276.

KAY, B. D.; SILVA, A. P.; BALDOCK, J. A. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: Predictions using pedotransfer functions. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 77, p. 655-667, 1997.

KAY, D. B.; HAJABBASI, M. A.; YING, J.; TOLLENAAR, M. Optimum versus non-limiting water contents for root growth, biomass accumulation, gas exchange and the rate of development of maize (*Zea mays* L.) **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, (No prelo).

KERTZMAN, F. F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocadas pela compactação do solo**. 1996. 176p. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P.L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo roxo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 6, p. 959-964, 2000.

KOOISTRA, M. J.; SCHOONDERBEEK, D.; BOONE, F. R.; VEEN, B. W.; NOORDWIJK, M. van. Root soil contact of maize, as measured by a thin section technique – II: effects of soil compaction. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 139, p. 119-129, 1992.

KOPI, A. J.; DOUGLAS, J. T. A rapid inexpensive and quantitative procedure for assessing soil structure with respect to cropping. **Soil Use and Management**, Oxon, v. 7, p. 52-56, 1991.

KRAMER, P.J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soils**. San Diego: Academic, 1995. 495 p.

KRZIC, M.; NEWMAN, R. F.; BROERSMA, K.; BOMKE, A. A. Soil compaction of forest plantations in interior British Columbia. **Journal of Range Management**, Lakewood, v. 52, p. 671-677, 1999.

LABOSKI, C. A. M.; DOWDY, R. H.; ALLMARAS, R. R.; LAMB, J. A. Soil strength and water content influences on corn root distribution in a sandy soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 203, p. 239-247, 1998.

LAL, R. **Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics**. Washington: Soil Management Support Services, 1994. 78p.(SMSS. Technician Monograph, 21).

LAMPURLANÉS, J.; CANTERO-MARTÍNEZ, C. soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 526-536, 2003.

LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNOE, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v 78, n 2, p.151-170, 2004.

LAURANI, R. A.; RALISCH, R.; FILHO, J. T.; SOARES, D. S.; RIBON, A. A. Distribuição de poros de um Latossolo Vermelho eutroférico na fase de implantação de um sistema de plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 347-354, 2004.

LEÃO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem**. 2002 58 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; A simplified Excel® algorithm for estimating the least limiting water range of soils. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 61, n. 6, p.649-654, 2004.

LEÃO, T. P., SILVA, A. P., MACEDO, M. C. M. et al. Least limiting water range in the evaluation of continuous and short-duration grazing systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p .415-422, 2004a.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; PERFECT, E.; TORMENA, C. A.. An algorithm for caculating the least limiting water range of soils using a statistical analysis system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 1210-1215, 2005c.

LEÃO, T. P., SILVA, A. P., MACEDO, M. C. M. et al. Least limiting water range:a potencial indicator of changes in near surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam (No prelo).

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

LI, H. L.; JIAO, J. J.; LUK, M, A falling-pressure method for measuring air permeability of asphalt in laboratory, **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 286, n. 1/4 , p. 69-77, 2004.

LIPIEC, J.; HAKANSSON, I. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam., v. 53, p. 87-94, 2000.

LONGSDON, S. D.; MCCOY, E. L.; ALLMARAS, R. R.; LINDEN, D. R. Macropores characterization by indirect methods. **Journal of Soil Science**, London, v. 155, p. 316-324, 1993.

MACARIOLA, N. R.; WOODHEAD, T. Soil penetration resistance. In: WOPEREIS, M.; KROPFF, M.; WIJK, A.; WOODHEAD, T. **Soil physical properties: Measurement and use in rice-based cropping systems**. China: IRRI, 1994. p. 59-64.

MARTINS, P. F. S.; CERRI, C. C.; VOLKOFF, B.; ANDREUX, F.; CHAUVEL, A. Consequences of clearing and tillage on the soil of a natural Amazonian ecosystem. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 38, p. 273-282, 1991.

MASLE, J. Growth and stomatal responses of wheat seedlings to spatial and temporal variations in soil strength of bi-layered soil. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 49, p. 1245-1257, 1998.

MASLE, J.; PASSIOURA, J. B. The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 14, p. 643-656, 1987.

MATERECHERA, S. A.; DEXTER, A. R.; ALSTON, A. M. Penetration of very strong soils by seeding of different plant species. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 135, n. 1, p. 31-41, 1991.

MCKENZIE, B. M.; DEXTER, A. R.; Methods for studying the permeability of individual soil aggregates. **Journal of agricultural Engineering Research**, London, v. 65, p. 23-28, 1996.

MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 197-202, 1999.

MONTAGU, K. D.; CONROY, J. P.; ATWELL, B. J. The position of localized soil compaction determines root and subsequent shoot growth response. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 52, p. 2127-2133, 2001.

MORAES, J. F. L. **Propriedades do solo e dinâmica da matéria orgânica associadas às mudanças do uso da terra em Rondônia (RO)/ Brasil**. 1995. 69p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

MORAES, J. F. L.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 70, p. 63-81, 1996.

MORAES, J. F. L.; CERRI, C. C.; MELILLO, J. M.; KICKLIGHTER, D. C.; NEILL, D.; STEUDLER, P. A. Soil carbon stocks of the Brazilian Amazon basin. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 59, p. 244-247, 1995.

MULLER, M. M. L.; GUIMARÃES, M. F.; DESJARDINS, T.; MARTINS, P. F. S. Degradação de pastagens na Região Amazônica: propriedades físicas do solo e crescimento de raízes **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1409-1418, 2001.

MURTY, D.; KIRSCHBAUM, M. F.; MCMURTRIE, R. E.; MCGILVRAY, H. Does conversion of Forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review to the literature. **Global Change Biology**, Oxford, v. 8, p. 105-123, 2002.

NEILL, C.; MELILO, J.; STEUDLER, P. A.; CERRI, C. C.; MORAES, J. F. L.; PICCOLO, M. C.; BRITO, M. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in the southwestern Brazilian Amazon. **Ecological Applications**, Washington, v. 7, n. 4, p. 1216-1225, 1997.

ORELLANA, J. A. de; PILATTI, M. A.; GRENON, D. A. Soil quality: an approach to physical state assessment. **Journal of Sustainable Agriculture**, New York, v. 9, n. 2, p. 91-108, 1997.

OTTEN, W.; GILLIGAN, C. A.; WATTS, C.; DEXTER, A. R.; HALL, D. Continuity of air-filled pores and invasion thresholds for a soil-borne fungal pathogen, *Rhizoctonia solani*. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 31, p. 1803-1810, 1999.

PASSIOURA, J. B.; GARDNER, P. A. Control of leaf expansion in wheat seedlings growing in drying soil. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 17, p. 149-157, 1990.

PAYTON, M. E.; MILLER, A. E.; RAUN, W. R. Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 31, n. 5/6, p. 547-551, 2000.

PEDLOWSKI, M. A.; DALE, V. D.; MATRICARDI, E. A. T. E.; SILVA FILHO, P. S. Patterns and impacts of deforestation in Rondônia, Brazil. **Landscape Urban Planning**, Amsterdam, v. 38, p. 149-157, 1997.

PHENE, C. J.; BEALE, W. High-frequency irrigation for water nutrient management in humid regions. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 40, p. 430-436, 1976.

PHILIPS, R. E.; KIRKHAM, D. Soil compaction in the field and corn growth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 54, p. 29-34, 1962.

PICCOLO, M. C. **Comportamento do nitrogênio do solo em cronossequências de floresta-pastagem em Rondônia**. 1994. 69 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

PICCOLO, M. C.; NEILL, C.; CERRI, C. C. Net nitrogen mineralization and nitrification along a tropical forest-to-pasture chronosequence. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 162, p. 61-70, 1994.

RICHARDS, L. A.; WEAVER, L. R. Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. **Soil Science**, Baltimore, v. 56, p. 331-339, 1944.

ROSA, A. **Práticas mecânicas e culturais na recuperação de características físicas de solos degradados pelo cultivo-solo Santo Ângelo (latossolo roxo distrófico)**. 1981, 136p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1981.

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

SANCHEZ, P.A. **Suelos del trópico - características y manejo**. San José, Instituto Interamericano de Cooperacion para la Agricultura, 1981. 645p.

SANTOS, M. J. C. **Avaliação econômica de quatro modelos agroflorestais em áreas degradadas por pastagens na Amazônia Ocidental**. 2000. 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

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

SCOOT, G.J.T.; WEBSTER, R.; NORTICLIFF, S. The topology of pores structure in cracking clay soil. **Journal of Soil Science**, London, v. 39, p. 303-314, 1988.

SEQUINATTO, L.; SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; STRECK, C. A.; KAISER, D. R. Sistemas de preparo do solo, resistência mecânica à penetração, disponibilidade hídrica e rendimento do feijoeiro. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 2002, Cuiabá, MT. **Resumos...**Cuiabá: s. ed., 2002 p. 74.

SERRÃO, E. A. S.; FALESI, I. C.; VEIGA, J. B.; TEIXEIRA NETO, J. F. Produtividade de pastagens cultivadas em solo de baixa fertilidade das áreas de floresta na Amazônia brasileira. In: TERGAS, L. E.; SANCHEZ, P. A.; SERRÃO, E. A. S. (Ed.). **Produção de pastagens em solos ácidos dos trópicos**. Brasília: CIAT; EMBRAPA, 1982, p. 219-252.

SHARMA, P .K.; BHUSHAN, L. Physical characterization of a soil amended with organic residues in a rice-wheat cropping system using a single value soil physical index. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, p.143-152, 2001.

SHER, M .J.; RAO, I. M.; AYARZA, M. A.; LASCANO, C. E.; SANZ, J. I.; THOMAS, R. J.; VERA, R. R. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American Savannas. **Nature**, London, v. 371, p. 236-238, 1994.

SHUKLA, M. K.; LAR, R. Air permeability of soils. In: LAL, R. **Encyclopedia of Soil Science**. New York: Marcel Dekker, 2002, p. 1-4.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.184, p.323-329, 1996.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 61, p .877-883, 1997.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, M. S. L.; RIBEIRO, M. R. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades morfológicas e físicas de solos argilosos de tabuleiro no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, p. 397-402, 1992.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SILVA, A. P.; BRAIDA, J. A.; KAISER, D. R. Intervalo hídrico ótimo para três solos em sistema de plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá, MT. **Resumos...**Cuiabá: s.ed., 2002, p. 4.

SMITH, C. W.; JOHNSTON, M. A.; LORENZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of south African forestry soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, n. 1/2, p. 93-111, 1997.

SOJKA, R. E.; BUSSCHER, W. J.; LEHRSCHE, G. A. In situ strength, bulk density, and water content relations of a durinodic xeric haplocalcid soil. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, n. 8, p. 520-529, 2001.

SOUZA, Z. M.; LEITE, J. A.; BEUTLER, A. N. Comportamento de atributos físicos de um Latossolo Amarelo sob agroecossistemas do Amazonas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 654-662, 2004.

SPAIN, J. M.; GUALDRON, R. Degradación e rehabilitación de pasturas. In: LASCANO, C.; SPAIN, J. M. (Ed.). **Establecimiento y renovación de pasturas**. CALI: CIAT, 1991. 426 p.

STIRZAKER, R. J.; PASSIOURA, J. B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. **Plant and soil**, Dordrecht, v. 185, n. 1, p. 151-162, 1996.

TABOADA, M. A.; LAVADO, R. S. Grazing effects on the bulk density in a Natraquoll of the Flooding Pampa of Argentina. **Journal of Range Management**, Lakewood, v. 41, p. 502-505, 1988.

TAPELA M.; COLVIN, T. S. Quantifying seedbed condition using soil physical properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 64, p. 203-210, 2002.

TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and to root systems subjected to soil compaction: towards a system with multiple signaling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 30, p. 217-243, 1994.

TAYLOR, H. M.; BURNETT, E. Influences of soil strength on the root growth habits of plants. **Soil Science**, Baltimore, v. 98, p. 174-180, 1964.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations to coarse textured materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, n. 1, p.18-22, 1966.

TIMLIM, D. J.; AHUJA, L. R.; ANKENY, M. D. Comparison of three field methods to characterize apparent macro pore conductivity. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v. 58, p. 278-284, 1994.

TONIOLO, A.; UHL, C. **Perspectivas econômicas e ecológicas da agricultura na Amazônia oriental**". In: ALMEIDA, O., (Org.,) A Evolução da fronteira Amazônica: oportunidades para um desenvolvimento sustentável. Belém: IMAZON, 1996. p 67-99.

TOPP, G. C.; GALGANOV, Y. T.; WIRES, K. C. CULLEY, J. L. B. **Non limiting water range (NLWR):** an approach for assessing soil structure.– Canada: Soil Quality Evaluation Program. Agriculture and Agri-Food Canada, 1994. 36 p. (Technical report, 2).

TORMENA, C. A. **Caracterização e avaliação do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo**. 1998. 106 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 573-581, 1998.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V. Intervalo ótimo de potencial da água no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo na agricultura irrigada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 286-292, 1999.

TWERDOFF, D. A.; CHANASYK, D. S.; MAPFUMO, E.; NAETH, M. A.; Baron, V. S. Impacts of forage grazing and cultivation on near-surface relative compaction. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 79, p. 465-471, 1999.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Madison, **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 44, p. 892-898, 1980.

VEIGA, J. B.; FALESI, I. C. Recomendação e prática de adubação em pastagens cultivadas na Amazônia brasileira. In: MATTOS, H. B.; WERNER, J. C.; YAMADA, T.; MALAVOLTA, E. (Ed.). **Calagem e adubação de pastagens**. Piracicaba. Associação Brasileira de Pesquisa da Potassa e do Fósforo (POTAFOS), 1986, p. 257-282.

VEIGA, J. B.; SERRÃO, E. A. S. Recuperación de pastures em la region este de la Amazonia brasileña. **Pasturas Tropicales**, Cali, v. 9, p. 40-43, 1987.

VEPRASKAS, M. J. Bulk density values diagnostic of restricted root growth in coarse-textured soils. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 52, p. 1117-1121, 1988.

VIEHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Soil moisture conditions in relation to plant growth. **Plant Physiology**, Rockville, v. 2, p. 71-78, 1927.

VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. L'humus des sols du Brésil: Nature et relations avec l'environnement. **Cahiers ORSTOM, série Pédologie**, v. 24, n. 2, p. 83-95, 1988.

VOORHESS, W. B.; SENST, C. G.; NELSON, W. W. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the northern Corn Belt. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 50, p. 728-33, 1978.

WARNAARS, B. C. & EAVIS, B. W. Soil physical conditions affecting seedling root growth. **Plant and soil**, Dordrecht, v. 36, p. 623-634, 1972

WEAICH, K.; BRISTOW, K. L.; CASS, A. Pre-emergent shoot growth of maize under different drying conditions. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 56, p. 1272-1278, 1992.

WEAICH, K.; CASS, A.; BRISTOW, K.L. Pre-emergent shoot growth of maize (*Zea mays* L.) as a function of soil strength. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 40, p. 3-23, 1996.

WILLAT, S. T.; PULLAR, D. M. Changes in soil physical properties under grazed pastures. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 22, n. 3, p. 343-348, 1984.

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUNSON, F.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Non limiting water range (NLWR) as index of soil quality as related to physical properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 114, p. 401-414, 2003.

ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMANN, J.; MIANO, T. M.; MILTNER, A.; SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, p. 117-161, 1997.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 38, p. 947-958, 2000.