

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Lenise Raquel Mentges

**INDICADORES DE TRANSPORTE DE ÁGUA NO INTERVALO
HÍDRICO ÓTIMO DO SOLO**

Santa Maria, RS,
2017

Lenise Raquel Mentges

**INDICADORES DE TRANSPORTE DE ÁGUA NO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO
DO SOLO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Paulo Ivonir Gubiani

Santa Maria, RS,
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Mentges, Lenise Raquel
INDICADORES DE TRANSPORTE DE ÁGUA NO INTERVALO
HÍDRICO ÓTIMO DO SOLO / Lenise Raquel Mentges.- 2017.
58 p.; 30 cm

Orientador: Paulo Ivonir Gubiani
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2017

1. Intervalo Hídrico Ótimo 2. Indicador de Transporte
de Água 3. Fluxo de Água 4. Retenção de Água 5. Qualidade
Física do Solo I. Gubiani, Paulo Ivonir II. Título.

© 2017

Todos os direitos autorais reservados à Lenise Raquel Mentges. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.
E-mail: lenisementges@yahoo.com.br

Lenise Raquel Mentges

**INDICADORES DE TRANSPORTE DE ÁGUA NO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO
DO SOLO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Aprovado em 21 de fevereiro de 2017:

Paulo Ivonir Gubiani, Dr.
(Presidente/Orientador)

Douglas Rodrigo Kaiser, Dr. (UFFS)

Ricardo Bergamo Schenato, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2017

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Nolar Ignácio Mentges e Cecília Fank Mentges, pela educação recebida, por me motivarem a chegar até aqui e por compreenderem os momentos de ausência.

Ofereço e dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar meu caminho e me conceder saúde para realizar meus sonhos.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Departamento de Solos e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pelo ensino de qualidade.

Ao meu orientador, professor Dr. Paulo Ivonir Gubiani, por toda dedicação, paciência, profissionalismo e orientação em todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do PPGCS pela dedicação e conhecimentos multiplicados.

A todos do Laboratório de Física do Solo, que de uma forma ou outra, colaboraram para a execução deste trabalho.

À Emater/RS – ASCAR por permitir que eu conciliasse o estudo ao trabalho e, assim, melhorar minha formação acadêmica.

Aos colegas do Escritório Municipal da Emater/RS-ASCAR de Novo Cabrais, por entenderem que a realização do mestrado foi importante para mim e por compreenderem meus dias de ausência no trabalho.

Aos meus pais, por todo o amor, carinho, incentivo, apoio e por me mostrarem o caminho do bem.

Aos meus irmãos, Marcelo Ivan e Thaís Regina, pelo carinho e motivação a seguir os estudos.

A todos meus amigos pela amizade, companheirismo e apoio, em especial à Carla Biesdorf, Sibila Nunes e Jucéli Muller, às quais tenho como irmãs de coração. Agradeço por permanecerem comigo nesta etapa da minha vida.

Ao meu namorado, Agnelo Machado, por tudo que representa para mim, pela amizade, companheirismo, paciência e amor. Por acreditar em mim, incentivar a buscar meus objetivos e estar ao meu lado em todo o desenvolvimento do trabalho.

E a todos que de uma forma ou outra me auxiliaram a concluir esta dissertação, meu sincero agradecimento!

Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana.

(Carl Gustav Jung)

RESUMO

INDICADORES DE TRANSPORTE DE ÁGUA NO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DO SOLO

AUTORA: Lenise Raquel Mentges
ORIENTADOR: Paulo Ivonir Gubiani

A necessidade de avaliar o efeito das práticas de manejo tem gerado interesse em definir Indicadores de Qualidade do Solo (IQS) que envolvam o resultado do manejo e o seu efeito no rendimento das culturas. Em termos de água no solo, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) é um IQS bastante utilizado, porém, com eficácia questionada por pesquisadores da Ciência do Solo. A crítica se deve ao fato do IHO, muitas vezes, não se relacionar com produção de grãos, ou ainda, a maior produtividade das culturas acontecer em condições de maior compactação do solo, onde o IHO teve redução. Este estudo considera que a análise de indicadores de transporte de água no solo pode auxiliar na compreensão de por que plantas conseguem produzir mais em condições de solo supostamente de menor qualidade física. Desse modo, este estudo teve por objetivo determinar o potencial de fluxo matricial (M) e a condutividade hidráulica (K) na faixa de conteúdo de água do IHO de um Argissolo e um Latossolo e avaliar como eles afetam a interpretação do IHO baseada apenas nos seus limites críticos de conteúdo de água. Em ambos os solos, os resultados indicaram que variações do M (dM) e a K aumentam onde o IHO sofre redução em função do aumento da densidade do solo (Ds), indicando que melhora a capacidade do solo em conduzir água, mesmo após a densidade do solo crítica (D_{sc}) calculada com o IHO. Ainda, os indicadores se correlacionam positivamente com a Ds independente do potencial matricial, melhorando o transporte de água, sendo essa influência maior para o Argissolo. A utilização dos indicadores de transporte de água juntamente com o IHO modificou a interpretação quanto ao fornecimento de água às plantas e a correlação que isso pode ter com rendimento das culturas, permitindo acreditar que indicadores de qualidade do solo, definidos apenas com base em conteúdo de água no solo, como é o caso do IHO, podem não ser adequados para prever a ocorrência de déficit hídrico. O efeito benéfico do aumento da Ds sobre o transporte de água não pode ser analisado individualmente ao se tratar de manejo de solo, visto que o aumento da Ds resulta em alterações não desejadas ao solo, e, assim, é importante observar o efeito global da compactação do solo. Estudos com plantas que avaliem a compensação do incremento de transporte de água sobre a redução no crescimento de raízes por resistência mecânica com o aumento da compactação seriam de grande utilidade.

Palavras-chave: Intervalo Hídrico Ótimo. Indicador de Transporte de Água. Retenção de Água. Fluxo de Água. Déficit Hídrico. Qualidade Física do Solo.

ABSTRACT

WATER TRANSPORT INDICATORS IN THE LAST LIMITING WATER RANGE

AUTHOR: Lenise Raquel Mentges

ADVISOR: Paulo Ivonir Gubiani

The need to evaluate the effect of management practices has generated interest in defining Soil Quality Indicators (SQI) that involve the management result and its effect on crop yield. In terms of water in the soil, the Last Limiting Water Range (LLWR) is a enough used SQI, but is efficacy questioned by Soil Science researchers. The criticism is due to the fact that the LLWR is often not related to grain production, or even the higher crop yields occur under conditions of higher soil compaction where the LLWR has been reduced. This study considers that the analysis of water transport indicators in the soil can help in the understanding of why plants can produce more under conditions of supposedly lower soil physical quality. Therefore, this study aimed to determine the matrix flow potential (M) and the hydraulic conductivity (K), in the LLWR of an Ultisol and an Oxisol and to evaluate how they modify the interpretation of the LLWR based only on its critical limits of water content. In both soils, the results indicated that variations of M (dM) and K increase where LLWR is reduced as a function of the increase of bulk density (Ds), indicating that it improves the capacity of the soil to conduct water, even after critical bulk density (D_{sc}) calculated with the LLWR. Also, the indicators correlate positively with the Ds independent of the matrix potential, improving the water transport, being this greater influence for the Ultisol. The use of the water transport indicators together with the LLWR modified the interpretation of the water supply to the plants and the correlation that this can have with crop yields, allowing to believe that soil quality indicators, defined only on the basis of water content, such as the LLWR, may not be adequate to predict the occurrence of water deficit. The beneficial effect of increasing Ds on water transport can not be analyzed individually when dealing with soil management, since increasing Ds results in undesirable soil changes, and so it is important to observe the overall effect of soil compaction. Studies with plants that evaluate the compensation of the increment of water transport on the reduction in the root growth by mechanical resistance with the increase of the compaction would be of great utility.

Keywords: Last Limiting Water Range. Water Transport Indicator. Water Retention. Water Flux. Water deficit. Physical Soil Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação gráfica do IHO e AD com base nos teores limites de conteúdo de água, relação com os fatores de restrição de crescimento de plantas e estresses mecânico, anóxico e hídrico.....	23
Figura 2 - Potencial de fluxo matricial em função do potencial matricial para solos de textura diferente.....	29
Figura 3 - Diagrama do intervalo hídrico ótimo gerado para o Argissolo (A) e para o Latossolo (B). Os símbolos da legenda representam o conteúdo de água para uma porosidade de aeração de 10% (θ_{pa}), resistência do solo à penetração de 2 MPa (θ_{rp}), capacidade de campo a 100 cm (θ_{cc}) e ponto de murcha permanente a 15000 cm (θ_{pmp}).....	39
Figura 4 - Exemplo dos gráficos da CRA ($U_v(h)$), saturação efetiva ($Se(h)$), condutividade hidráulica ($K(h)$) e potencial de fluxo matricial ($M(h)$), de uma amostra do Argissolo.....	43
Figura 5 - Relação do IHO do Argissolo com o dM (em escala logarítmica de base 10) para os intervalos $dM_{8000-15000}$, $dM_{330-15000}$, $dM_{100-15000}$, $dM_{330-8000}$ e $dM_{100-330}$	47
Figura 6 - Relação do IHO do Latossolo com o dM (em escala logarítmica de base 10) para os intervalos $dM_{8000-15000}$, $dM_{330-15000}$, $dM_{100-15000}$, $dM_{330-8000}$ e $dM_{100-330}$	48
Figura 7 - Relação do IHO do Argissolo com a K (em escala logarítmica de base 10) nas tensões de 100 cm (K_{100}), 330 cm (K_{330}), 8000 cm (K_{8000}) e 15000 cm (K_{15000}).....	51
Figura 8 - Relação do IHO do Latossolo com a K (em escala logarítmica de base 10) nas tensões de 100 cm (K_{100}), 330 cm (K_{330}), 8000 cm (K_{8000}) e 15000 cm (K_{15000}).....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros ajustados para a equação da resistência do solo à penetração (RP) em função da umidade volumétrica do solo (θ) e da densidade do solo (Ds) (Equação 6) e da equação para o conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{cc}) em função da Ds (Equação 8).....	38
Tabela 2 - Estatística descritiva dos parâmetros do modelo de Van Genuchten para a curva de retenção de água e da condutividade hidráulica do solo saturado para o Argissolo e Latossolo.....	41
Tabela 3 - Estatísticas descritivas do coeficiente de correlação de Pearson (r) entre dM e densidade do solo dentro do limite de água disponível.....	44
Tabela 4 - Estatísticas descritivas do coeficiente de correlação de Pearson (r) entre dM e densidade do solo dentro de diferentes faixas de potencial matricial.....	46
Tabela 5 - Estatísticas descritivas do coeficiente de correlação de Pearson (r) entre K e densidade do solo nos potenciais matriciais de 100, 330, 8000 e 15000 cm.....	50

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - $IHO = \max[0, \min(\theta_{cc}, \theta_{pa}) - \max(\theta_{pmp}, \theta_{rp})]$	31
Equação 2 - $M = - \int_{h_i}^{h_f} K(h) dh$	31
Equação 3 - $K = K_s S_e^\gamma \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2$	32
Equação 4 - $\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{-m}$	32
Equação 5 - $K_s = \frac{QL}{A(L+H)}$	32
Equação 6 - $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{-m}$	32
Equação 7 - $RP = a_1 Ds^{b_1} \theta^{c_1}$	34
Equação 8 - $\theta_{pa} = \left(1 - \frac{Ds}{Dp} \right) - 0,1$	34
Equação 9 - $\theta_{100} = a_2 Ds + b_2$	34
Equação 10 - $\theta_{15000} = U_{15000} \frac{Ds}{Da}$	34
Equação 11 - $U_{15000} = 559h^{-0,3753}$	35
Equação 12 - $U_{15000} = 1899h^{-0,1309}$	35
Equação 13 - $\theta_{2MPa} = \left(\frac{RP}{a_1 Ds^{b_1}} \right)^{\frac{1}{c}}$	35
Equação 14 - $M_i = - \sum_{h_{15000}}^{h_i} K(h_i) (h_{i+1} - h_i)$	35
Equação 15 - $dM = -(M_i - M_{i+1})$	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	HIPÓTESES	17
3	OBJETIVO	18
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1	A ABSORÇÃO DE ÁGUA PELAS PLANTAS.....	19
4.2	LIMITES DE DISPONIBILIDADE DE ÁGUA E O CONCEITO DE INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO.....	20
4.3	ASSOCIAÇÃO ENTRE IHO E PRODUÇÃO DAS CULTURAS.....	24
4.4	INDICADORES DE TRANSPORTE DE ÁGUA NO SOLO.....	26
5	MATERIAL E MÉTODOS	30
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
6.1	INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO.....	37
6.2	VARIABILIDADE DOS PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DO POTENCIAL DE FLUXO MATRICIAL.....	40
6.3	RELAÇÃO ENTRE VARIAÇÃO NO POTENCIAL DE FLUXO MATRICIAL E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E O INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO.....	45
7	CONCLUSÃO	53
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

O uso sustentável do solo tem se tornado um tema com relevância na comunidade acadêmica e para a sociedade em geral, e assim, muito se fala em Qualidade do Solo (QS). A análise para verificar se o manejo do solo está sendo adequado agrônomo, econômica e ambientalmente, tem motivado esforços para a determinação de Indicadores de Qualidade do Solo (IQS).

Os IQS são utilizados para avaliar terras em relação à degradação e julgar práticas de manejo, a fim de monitorar as mudanças nas propriedades e processos do solo provocadas pelo uso. Para ser um bom IQS, ele precisa integrar as propriedades biológicas, físicas e químicas do solo e seus respectivos processos, ser sensível a variações de manejo, deve ser prático, de fácil medição e reprodução e, sobretudo, sistêmico, descrevendo a maioria dos processos ecológicos do solo, e dessa forma, relacionar-se com a produtividade das culturas. Um IQS assim abrangente pode não ser simples nem prático. Por isso, vários indicadores menos abrangentes, que tratam de propriedades ou processos físicos, químicos ou biológicos vem sendo propostos. Nesse sentido, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) é um IQS baseado em fatores físicos do solo e indica qualidade física do solo para o crescimento de plantas.

O IHO é um intervalo de conteúdo de água no solo (θ), definido por limites superiores (θ na capacidade de campo, θ_{cc} , ou θ para porosidade de aeração crítica θ_{pa}) e inferiores (θ no ponto de murcha permanente, θ_{pmp} , ou θ no qual a resistência a penetração é crítica, θ_{rp}). A maioria dos estudos considera que θ_{pa} é o θ que corresponde a 90% de grau de saturação (10% da porosidade total ocupada com ar) e θ_{rp} é o θ no qual resistência à penetração (RP) é 2 MPa. Em geral, o IHO decresce com o aumento da densidade do solo (Ds), e solos com maior IHO são considerados com maior qualidade física.

A expectativa na sua proposição é que a simplicidade de determinação do IHO o tornaria um bom IQS. No entanto, a sua eficácia tem sido questionada, pois a relação entre produção vegetal e o IHO não tem se confirmado. Em muitos trabalhos, a produção não se alterou ou foi até superior para IHO menores. Isto sugere que a diminuição do IHO ou o aumento da Ds não necessariamente estão associados com a dificuldade da planta em extrair a água do solo.

Muitas críticas são feitas ao IHO por seus limites serem definidos por valores fixos e, portanto, abruptos, principalmente os limites inferiores. Ainda, por não ser considerado os estádios fenológicos de desenvolvimento das culturas, desconsiderando também a profundidade, crescimento e distribuição do sistema radicular, o índice de área foliar e outros parâmetros fisiológicos que interferem na absorção de água e nutrientes pela planta.

O aumento do grau de compactação do solo provoca alterações na distribuição de poros, com diminuição do volume de macroporos e aumento dos microporos. Embora haja redução da condutividade hidráulica quando o solo está saturado (K_s), para θ menores que θ_{cc} , maior volume de poros de menor diâmetro permanecem preenchidos com água com o aumento da D_s . Conseqüentemente, o aumento da D_s pode aumentar a condutividade hidráulica de solo não saturado (K) e favorecer o transporte de água no solo em direção à raiz. Decorrente disso, o fluxo de absorção de água pelas plantas pode não ser prejudicado com o aumento da compactação do solo. Essa seria uma provável explicação de porque mesmo havendo aumento da compactação e diminuição do IHO não há diminuição da produção das culturas.

Nesse contexto, a análise da variação da K e do potencial de fluxo matricial ou transformado de Kirchhoff (M) no IHO é útil para explicar a pequena relação entre o IHO e a produtividade das culturas. Ao se compreender melhor a influência da D_s no transporte de água ao se relacionar esses indicadores com IHO, podem surgir indícios de por que plantas conseguem produzir mais grãos em solos considerados de menor qualidade física.

2 HIPÓTESES

1) A densidade do solo em que ocorrem valores máximos dos indicadores de transporte de água dM e K é maior que aquela que ocorrem os maiores valores de IHO .

2) O aumento da densidade do solo favorece o transporte de água no solo, definido pelos indicadores de transporte de água dM e K .

3 OBJETIVO

Verificar o efeito da Ds nos indicadores de transporte de água, dM e K, dentro do IHO para avaliar se eles modificam a interpretação do IHO em relação à expectativa de produtividade das culturas.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 A ABSORÇÃO DE ÁGUA PELAS PLANTAS

A água é o principal constituinte das células vegetais em crescimento. Atua como solvente, influencia as estruturas de proteínas, ácidos nucléicos, polissacarídeos e outros componentes celulares, é o meio para movimento das moléculas e para as reações bioquímicas celulares, participando também de reações químicas essenciais (TAIZ; ZEIGER, 2006a). Sendo a água de tal importância, ela representa um dos fatores mais limitantes para a produtividade das culturas.

O processo de absorção de água pelas plantas e a intensidade com que isso acontece depende de vários fatores ligados ao sistema solo-planta-atmosfera. Dentre estes fatores está o conteúdo de água (θ), o potencial da água e o fluxo da água no solo, o dossel de plantas e estágio de desenvolvimento da cultura e o sistema radicular, além da demanda atmosférica.

O movimento de água no solo se dá predominantemente por fluxo de massa e obedecendo a um gradiente de potencial, indo do maior para o menor potencial (LIBARDI, 2010), ou seja, se considerar apenas o potencial matricial, move-se de pontos com maior conteúdo de água para pontos de menor conteúdo de água buscando o equilíbrio e reduzindo a diferença de potencial (HILLEL, 1998). À medida que a planta absorve água forma-se um gradiente de potencial entre a rizosfera e as outras regiões do solo, fazendo com que a água migre para essa região. A taxa com que isso acontece, ou seja, o fluxo de água no solo depende do gradiente de potencial e das características hidráulicas do solo (REICHERT et al., 2011).

Uma das principais características do solo, responsável pelo fluxo de água é a condutividade hidráulica (K). A K representa a facilidade com que a água se movimenta no solo e é influenciada pelo conteúdo de água no solo e pela estrutura do mesmo, estando fortemente ligada ao sistema poroso, em especial à quantidade de poros, tamanho, morfologia e continuidade dos mesmos, e desta forma, tem relação com o manejo do solo.

A redução do conteúdo de água no solo resulta em menores valores de K (LIBARDI, 2010; DRAYE et al., 2010) e, por consequência, menor fluxo de água, pois, mesmo que o gradiente de pressão esteja alto e as condições de porosidade sejam adequadas, o fluxo de água reduz, pois passa a ocorrer através dos filmes

que se formam na superfície das partículas (HILLEL, 1998). A K, em geral, também se relaciona com a Ds, sendo que o aumento da Ds aumenta a K, pois aumenta o número de microporos que ficam preenchidos com água numa dada tensão, aumentando a área útil para o fluxo (RICHARD et al., 2001), ou também pelo aumento do contato entre agregado e continuidade para o fluxo de água (CARMINATI et al., 2008).

O fluxo de água do solo para a planta ocorre quando há um gradiente de potencial, sendo mais negativo na planta, e dessa forma, permite que ela absorva a água do solo. A quantidade de água que pode ser absorvida pela planta (taxa de absorção) depende do volume de solo explorado, ou seja, da densidade do sistema radicular e estrutura do solo, além do estado energético em que a água se encontra no solo, do movimento da água em direção às raízes e da demanda atmosférica (KIRKHAM, 2005; REICHERT et al., 2011), além das características morfológicas e fisiológicas da planta.

A evaporação da água depende das variáveis meteorológicas radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar e vento (SANGOI, et al., 2010), e das condições físicas do solo, dentre elas o conteúdo de água e seu transporte pelo solo. A taxa de absorção de água pela planta depende da taxa de transpiração e das propriedades hidráulicas do solo, e sempre que a taxa de transpiração for maior que taxa de absorção haverá estresse hídrico. A probabilidade com que o estresse hídrico ocorra aumenta com o decréscimo do conteúdo de água e com o aumento da demanda de transpiração (condição de planta e atmosféricas).

4.2 LIMITES DE DISPONIBILIDADE DE ÁGUA E O CONCEITO DE INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO

A água, o oxigênio, a temperatura e a impedância mecânica são fatores que afetam diretamente o crescimento das plantas, em seus diferentes estágios de desenvolvimento (FORSYTHE, 1967; LETEY, 1985). O teor de água do solo controla estes fatores, os quais são afetados pela densidade do solo e distribuição do tamanho de poros (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003). O aumento no teor de água reduz a aeração e a resistência do solo à penetração e diminui a temperatura do solo, pois aumenta a condutividade térmica e o calor latente. A qualidade estrutural exerce grande influência na disponibilidade de água, sobretudo por

determinar o volume de solo explorado pelo sistema radicular, e, conseqüentemente, a quantidade de água que pode ser acessada pela planta.

O IHO é um indicador de qualidade física do solo, pois integra num só índice os fatores físicos diretamente relacionados com o desenvolvimento das plantas. O conceito de IHO foi introduzido no Brasil a partir do trabalho desenvolvido por Tormena; Silva; Libardi (1998) e é a tradução literal para o termo inglês *Least Limiting Water Range* (LLWR) (SILVA; KAY; PERFECT, 1994). O LLWR segundo este mesmo autor, representa uma proposição matemática para o termo *Non Limiting Water Range* (NLWR) introduzido por Letey (1985), o qual define a faixa de teores de água onde não haveria limites ao crescimento das plantas devido ao potencial matricial, aeração e impedância mecânica.

O IHO é definido através de quatro teores-limite de água, todos à base de volume ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), sendo eles associados com o potencial matricial ou disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração das raízes.

Um dos limites superiores é a porosidade de aeração (θ_{pa}), a qual é considerada como a aeração mínima para não ocorrer estresse anóxico. O O_2 no solo fornece energia para diversos processos metabólicos das plantas e microrganismos do solo, incluindo a absorção ativa de íons pelas raízes das plantas. Em relação à disponibilidade de O_2 no ambiente radicular, é mais importante, segundo Silva et al. (2010), a taxa de difusão de oxigênio, que é a capacidade do solo em permitir uma difusão adequada deste gás da atmosfera para as raízes, do que a quantidade volumétrica em si. A difusão do oxigênio depende da porosidade de aeração e usualmente tem-se considerado o valor de $\theta_{pa} = 10\%$ ou $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (REYNOLDS et al., 2002) como sendo o valor crítico para a taxa de difusão do oxigênio. O solo com valores de θ_{pa} inferiores aos citados acima, podem representar risco de estresse anóxico às plantas.

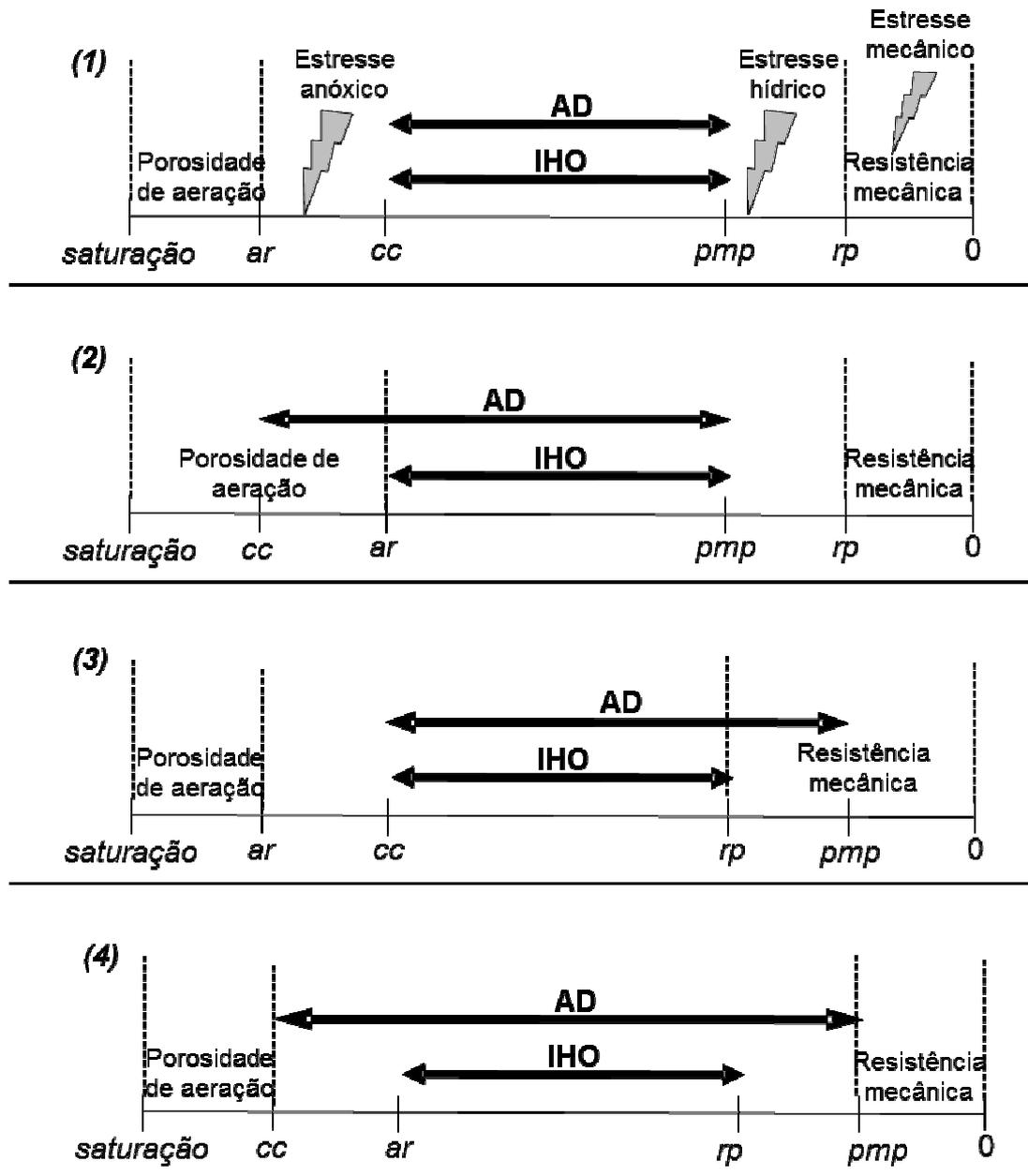
Outro teor-limite é o conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{cc}). Entende-se como θ_{cc} a quantidade de água que fica retida no solo após a chuva ou irrigação, onde num primeiro momento a água encontra-se com potencial zero e a água estaria livre (SILVA et al., 2010) e passa a drenar devido a ação do campo gravitacional. Quando a drenagem se torna desprezível, o solo atinge o limite superior da disponibilidade de água às plantas, ou seja, a capacidade de campo. Essa condição ocorre normalmente depois de dois ou três dias após a chuva ou irrigação em solos permeáveis, de textura e estrutura uniformes (REICHARDT,

1988). Após o θ_{cc} , a redução do conteúdo de água no solo ocorre devido à evaporação e à absorção de água pelas plantas, até chegar em um determinado potencial no qual a energia com que a água é retida no solo supera a capacidade das plantas em absorver esta água, e a planta murcha permanentemente (SILVA et al., 2010). Neste potencial, o conteúdo de água do solo encontra-se no ponto de murcha permanente, θ_{pmp} , e, teoricamente, a planta perde o turgor, o qual é irreversível. O ponto de murcha permanente possui boa correlação com o potencial de água no solo de -1,5 MPa, enquanto a capacidade de campo é considerada no potencial de -0,01 MPa para solos tropicais (SILVA; KAY; PERFECT, 1994; SILVA et al., 2010). A água retida no solo entre os potenciais da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente é denominada de água disponível (AD) (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998) e tem sido utilizada no desenvolvimento de estratégias de manejo do solo e na irrigação das culturas.

A diminuição da quantidade de água do solo tem relação inversa com a resistência a penetração (RP) das raízes no solo, sendo o θ o principal fator que controla a resistência do solo à penetração, a qual também se associa a compactação do solo (KAISER, 2010). Quando a RP atinge valores de 2 MPa ela é considerada crítica, sendo este valor o usualmente utilizado para determinar o quarto teor-limite de água no solo para a quantificação do IHO (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998). O efeito da alta RP depende da fase de desenvolvimento da cultura, pois o crescimento radicular normalmente cessa a partir do florescimento das plantas e, nesse caso, a deficiência de água e de oxigênio poderá ser o principal fator limitante à produção das culturas (TAIZ; ZIEGER, 2006b). O aumento da RP não gera dispêndios significativos de energia para o crescimento radicular, mas afeta a taxa de alongação das raízes (SILVA, et al., 2010), as quais ficam concentradas em determinadas camadas do solo ou crescem através de fissuras ou bioporos formados pela decomposição de raízes ou pela mesofauna do solo (KAISER, et al., 2009; SILVA, et al., 2010).

O IHO e a AD podem se combinar de quatro diferentes formas, mas sempre o IHO é igual ou inferior a AD (JONG VAN LIER; GUBIANI, 2015). Estas combinações podem ser visualizadas na figura abaixo.

Figura 1 - Representação gráfica do IHO e AD com base nos teores limites de conteúdo de água, relação com os fatores de restrição de crescimento de plantas e estresses mecânico, anóxico e hídrico*.



* Adaptado de Letey (1985) e Jong van Lier; Gubiani (2015).

O estresse anóxico ocorre sempre que o θ_{cc} é maior que o θ_{ar} , (combinações 2 e 4) e, neste caso, mesmo que esta faixa de θ esteja fora do IHO, ela é considerada como água disponível às plantas. Já no limite inferior, se o θ_{rp} for maior que o θ_{pmp} , ocorre estresse mecânico, com restrições ao sistema radicular, mesmo que o θ seja considerado ainda disponível às plantas.

Apesar da ampla utilização do IHO e da AD como indicadores de qualidade física do solo, estes parâmetros não permitem conhecer a taxa de absorção de água pelas plantas, e, portanto, não permitem quantificar o estresse hídrico.

4.3 ASSOCIAÇÃO ENTRE IHO E PRODUÇÃO DAS CULTURAS

Os IQS são uma das ferramentas utilizadas para avaliar o manejo do solo com vista a sustentabilidade dos agroecossistemas. Em Física do Solo, estes indicadores referem-se à qualidade estrutural do solo e, segundo Jong van Lier; Gubiani (2015) às propriedades de transferência e armazenagem de massa e energia, correspondendo aos teores de água, de solutos, de componentes de ar e de energia térmica adequados para maximizar o desenvolvimento de culturas. Nesse sentido, o IHO ao estar relacionado com os fatores de crescimento e desenvolvimento de plantas, com o conteúdo de água, ar, solutos e seus fluxos no solo, frequentemente é utilizado para indicar a qualidade física do solo, principalmente nas pesquisas brasileiras.

Espera-se que um IQS esteja relacionado com a produção vegetal, no entanto, em poucos dos trabalhos nos quais o IHO foi quantificado, buscou-se essa relação com as culturas. Em geral, os valores não são testados e confrontados com medições biológicas de crescimento, desenvolvimento e/ou produtividade vegetal, e onde isso aconteceu, a correlação entre IHO e estas medidas foram baixas.

As críticas em relação ao IHO como IQS estão relacionadas a dois pontos gerais: 1) desconsidera a espécie vegetal e o estágio de desenvolvimento da cultura; 2) os teores-limites de conteúdo de água não são adequados e não conseguem abranger os processos que limitam a produtividade das culturas.

Em relação ao primeiro ponto, deve ser observado que as espécies possuem demandas hídricas, morfologia radicular, volume de solo e profundidade explorados diferenciados, períodos críticos ao déficit hídrico em estádios de desenvolvimento distintos e necessidades variadas ao longo do ciclo das culturas. As plantas reagem de forma diferente ao estresse, o que lhes confere resistência às adversidades.

No início do ciclo das culturas, a porosidade de aeração tem sua importância reduzida se comparada aos estádios seguintes. Já o déficit hídrico, nos estádios iniciais, devido a menor densidade radicular, tem maior efeito sobre as culturas, ao passo que a demanda hídrica requerida na transpiração aumenta com o acúmulo de

massa verde. A restrição mecânica ao crescimento radicular é mais severa até o florescimento, momento em que aproximadamente 80% das raízes já estão desenvolvidas nas culturas anuais. A partir do período reprodutivo a resistência mecânica perde a importância biológica e não tem mais sentido a utilização do θ_{rp} como teor-limite do IHO. Neste estágio a falta de água representa danos mais severos ao rendimento das culturas.

Os limites superiores parecem apresentar menos incoerências que os inferiores, pois a ocorrência de estresse anóxico, devido o θ_{cc} ser superior ao θ_{pa} , é menos frequente que estresse mecânico ou hídrico (déficit) para as condições de cultivo de espécies agrícolas, as quais são, em geral, cultivadas em solos bem drenados.

A utilização do θ_{pmp} como limite inferior do IHO pode não ser um parâmetro adequado, pois neste conteúdo de água, a planta encontra-se em déficit hídrico irreversível. Em conteúdos de água um pouco acima do θ_{pmp} , a planta já sofre com a falta de água, e, segundo a atual definição de IHO, esta faixa de θ ainda é considerada ótima. Jong van Lier; Gubiani (2015) sugerem a substituição do θ_{pmp} por um conteúdo de água crítico, onde inicia o déficit hídrico, como alternativa ao problema acima descrito.

O limite inferior θ_{rp} utilizado na proposição do IHO, normalmente é fixado em 2 MPa (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998), ou maiores, como 3,5 MPa, sugerido por Moraes et al. (2014) e Klein; Camara (2007). A divergência entre o valor a ser utilizado e as diferenças existentes entre espécies e cultivares quanto a importância da resistência à penetração e alongação radicular, tornam este limite questionável. Beutler et al. (2006) verificaram que os valores de RP a partir dos quais a produtividade da soja começou a decrescer variaram de 2,24 a 2,97 MPa. Ainda, Silva; Kay; Perfect, (1994) salientaram que não há relação entre a resistência do solo obtida com um penetrômetro, que é mais aplicável a uma matriz homogênea, e o crescimento de plantas em solos com macroestrutura.

Trabalhos que relacionam o IHO com produção de grãos são escassos na literatura. Beutler et. al. (2008), avaliando a compactação do solo ocasionada pelo tráfego de máquinas na produtividade da soja, observou que valores menores de D_s e valores de alta D_s refletiram em menor produtividade desta cultura. O autor sugere que isso ocorreu devido ao menor contato entre raiz e solo e menor absorção de água e nutrientes em condição de baixa D_s , e devido à restrição ao crescimento

radicular na maior D_s . No mesmo trabalho, os autores observaram efeito negativo na produtividade da soja devido ao estresse anóxico, em curtos períodos de tempo logo após a irrigação ou precipitação, o qual foi intensificado em maiores valores de D_s . Beutler et. al. (2008) observou relação entre o IHO e produtividade da soja, uma vez que a redução do rendimento iniciou em valores de D_s muito próximos ao valor da D_s onde o IHO = 0. Em outro estudo, Freddi et al. (2007) encontraram maior produtividade do milho em condições de D_s próximas à densidade crítica (D_{sc}). Ramos et. al. (2015), ao estudar a relação entre o IHO e atributos físicos do solo, níveis de nutrientes e produtividade da soja, encontraram apenas correlação do IHO com alguns macro e micronutrientes. O coeficiente de correlação de Pearson foi de 0,01 e 0,04 ($P < 0,05$) para a correlação produtividade da soja e IHO na camada de 0 – 10 cm e 10 – 20 cm, respectivamente, não sendo significativo. Também no estudo desenvolvido por Gubiani et al. (2013) não houve correlação significativa entre IHO e rendimento de grãos de milho em 8 cultivos. No entanto, houve correlação positiva entre IHO e parâmetros de crescimento de planta, como altura de plantas, profundidade do sistema radicular e índice de área foliar.

Em geral, a baixa correlação do IHO com produtividade das culturas, o que não é esperado de um IQS, pode estar relacionado aos dois fatores anteriormente citados, porém, o presente trabalho considera um terceiro ponto. Sugere que um dos principais motivos para o IHO não se correlacionar com produção vegetal é o fato de que o teor de água no solo por si só não indica a ocorrência de estresse hídrico, uma vez que o mesmo depende da relação taxa de absorção/taxa de transpiração. Nesse sentido, indicadores de fluxo de água, como a condutividade hidráulica do solo não saturado (K) e o potencial de fluxo matricial ou transformado de Kirchhoff (M) poderiam ajudar a compreender o fato de que, em muitos trabalhos, como o de Streck (2003), Collares et al. (2006) e Gubiani (2008, 2012), o maior rendimento relativo ocorreu em regiões de menor IHO, ou mesmo após a D_{sc} , como em Beutler et al. (2006).

4.4 INDICADORES DE TRANSPORTE DE ÁGUA NO SOLO

Como visto anteriormente, o conteúdo de água no solo, dentro ou fora dos limites do IHO, analisado individualmente, pode não ser suficiente para prever a ocorrência de déficit hídrico. Nesse contexto, a determinação de indicadores de

transporte de água, como a K e o M dentro do IHO pode ser útil para explicar a relação entre o IHO e a produtividade das culturas.

O fluxo de água entre dois pontos no interior do solo depende da diferença de potencial total, da distância e da condutividade hidráulica, conforme descreve a equação de Darcy-Buckingham (LIBARDI, 2010).

A condutividade hidráulica do solo é uma propriedade que indica a capacidade do solo em deixar passar água através do seu perfil conforme seu estado hídrico. Em experimento de evaporação, utilizando tensiômetros de polímeros para determinar as propriedades hidráulicas do solo, dentre elas a condutividade hidráulica, Durigon; Jong van Lier (2011) observaram relação exponencial direta entre condutividade hidráulica e teor de água no solo, de forma que a condutividade hidráulica é maior em maiores teores de água ou ainda, em potenciais matriciais menos negativos. Quando o solo está saturado, todos os poros estão preenchidos e conduzindo água. Em solos que tiveram seu sistema poroso alterado pelo efeito da compactação, com aumento do volume de poros de menor diâmetro, em θ menores que θ_{cc} , maior volume de poros de menor diâmetro permanecem preenchidos com água, o que favorece o transporte de água no solo em direção a raiz. Em função disso, o fluxo de absorção de água pelas plantas pode não ser prejudicado com o aumento da compactação do solo, o que pode ser uma provável explicação de porque plantas podem produzir mais em solos com maior compactação ou quando o IHO já sofreu redução.

Os valores de potencial matricial onde a condutividade hidráulica é crítica, ou seja, no ponto em que a condutividade do solo é menor que a condutividade da raiz (início da limitação ao fluxo de absorção de água), variam, segundo Draye et al. (2010), entre -0,01 MPa para solos arenosos a -0,1 MPa para os de textura média. Porém, o solo sempre controla a absorção a -1,5 MPa, correspondente a tensão no ponto de murcha permanente.

A condutividade está intimamente ligada ao sistema poroso, englobando propriedades relacionadas à porosidade total, distribuição de tamanho de poros, morfologia, continuidade de poros e orientação dos mesmos.

Como visto anteriormente, o conteúdo de água do solo isoladamente não é suficiente para prever a ocorrência de déficit hídrico. Além deste fator, a taxa de transpiração potencial, a densidade radicular e as propriedades hidráulicas do solo, que determinam o potencial na raiz necessário para extrair a requerida quantidade

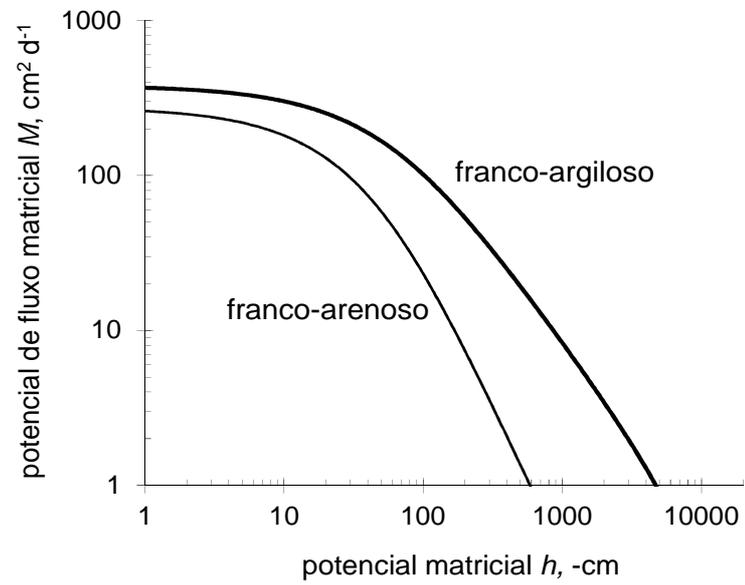
de água do solo, também determinam a ocorrência do déficit hídrico. No limite inferior de disponibilidade de água às plantas, ou seja, próximo ao θ_{pmp} , a retenção e a condutividade hidráulica são as propriedades de interesse (JONG VAN LIER; GUBIANI, 2015). Nesse sentido, o potencial de fluxo matricial, que é a integração da K entre um potencial matricial de referência até o potencial matricial de interesse, pode ser o parâmetro físico mais diretamente ligado à disponibilidade de água às plantas (JONG VAN LIER, 2010). O M integra a retenção e a condutividade de água no solo e é um parâmetro utilizado para modelar o fluxo de água nos casos em que o gradiente gravitacional é de pouca importância, que é, por exemplo, a extração de água do solo pelas raízes de plantas.

A função M pode ser calculada por integração analítica ou numérica da função K . Na figura abaixo há a representação gráfica do M em função do potencial matricial para dois solos de diferentes texturas.

A Figura 2 mostra que há redução de M à medida que o potencial matricial fica mais negativo ou diminui a quantidade de água no solo. Essa redução se deve à redução de K em função do θ . Para potenciais matriciais pouco negativos a diferença relativa entre os valores de M para os dois solos é pequena, mas para potenciais matriciais mais negativos o M do solo franco-argiloso se torna maior que o do solo franco-arenoso, indicando uma disponibilidade de água no solo franco-argiloso muito maior, ou que a K neste solo e condições de potencial matricial é superior.

O valor de M por si só não representa movimento de água no solo, embora elevados valores de M indiquem facilidade de transporte de água. Para se ter uma ideia de quanto a condição hídrica do solo é favorável ao movimento de água é mais interessante avaliar a variação de M entre diferentes potenciais matriciais (dM).

Figura 2 - Potencial de fluxo matricial em função do potencial matricial para solos de textura diferente.



Fonte: Jong van Lier; Gubiani (2015).

5 MATERIAL E MÉTODOS

Para realização deste estudo foram coletadas amostras de solo em dois locais, onde haviam sido conduzidas duas teses de doutorado (GUBIANI, 2012; KAISER, 2010), as quais avaliaram a relação da resposta da cultura do milho com o IHO. Um dos solos é um Argissolo Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 2006), localizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, município de Santa Maria – RS. De acordo com Kaiser (2010), a textura do solo até a profundidade de 20 cm é franco arenoso (610 g kg⁻¹ de areia, 300 g kg⁻¹ de silte e 120 g kg⁻¹ de argila). O outro solo é um Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2006), localizado no município de Augusto Pestana - RS. De acordo com Gubiani (2012), a textura do solo até a profundidade de 10 cm é muito argiloso (130 g kg⁻¹ de areia, 230 g kg⁻¹ de silte e 640 g kg⁻¹ de argila). Em ambos os locais, diferentes níveis de compactação foram estabelecidos nos estudos de Kaiser (2010) e Gubiani (2012) para que houvesse variação no IHO. Para isso, a condição estrutural do solo sob plantio direto que existia em cada local foi modificada com aração e escarificação (descompactação) e tráfego de máquinas (compactação). Nessas condições, um cultivo de milho foi conduzido no estudo de Kaiser (2010) e oito cultivos também de milho foram conduzidos no estudo de Gubiani (2012).

O motivo principal de escolher esses locais se deve ao fato de que nem Kaiser (2010) nem Gubiani (2012) detectaram relação coerente entre crescimento e rendimento da cultura do milho com o IHO. Nos oito cultivos do estudo de Gubiani (2012), alguns foram sob condições severas de estresse hídrico, o que favoreceria a existência de relação entre resposta de plantas com compactação do solo via IHO. Contudo, essa relação esperada não se confirmou. Em vista disso, é importante investigar nesses mesmos solos se o aumento da compactação favorece o transporte de água no solo na faixa de água disponível, cujos limites também delimitam o IHO. Melhorias no transporte de água no solo compensariam a menor exploração do solo pelas raízes causada por impedimento mecânico, o que enfraqueceria a relação esperada entre resposta de plantas e IHO.

O potencial de fluxo matricial (JONG VAN LIER, 2010) é uma propriedade relacionada ao transporte de água no solo que vem ganhando bastante atenção na modelagem de absorção de água pelas plantas (JONG VAN LIER, 2010), pois gradientes de M representam a densidade de fluxo de água no solo sob efeito

exclusivo do potencial matricial, componente de potencial que domina o transporte de água na faixa de água disponível às plantas. Por isso o M será utilizado nesta dissertação como indicador de transporte de água no solo a ser avaliado na faixa de água disponível às plantas. Primeiramente será descrita a definição sucinta do IHO e do M e, na sequência, será detalhado como eles foram caracterizados nos solos dos dois locais.

O IHO é definido por:

$$IHO = \max[0, \min(\theta_{cc}, \theta_{pa}) - \max(\theta_{pmp}, \theta_{rp})] \quad (1)$$

em que “max” representa a função “máximo” ($\max(i,j) = i$ se $i \geq j$; $\max(i,j) = j$ se $i < j$) e “min” é a função “mínimo” ($\min(i,j) = i$ se $i \leq j$; $\min(i,j) = j$ se $i > j$). O θ_{cc} é o teor de água na capacidade de campo, θ_{pa} é o teor de água limite para aeração adequada, θ_{pmp} é o teor de água no ponto de murcha permanente e θ_{rp} é o teor de água que corresponde ao limite da resistência à penetração. Para obtenção do IHO para diferentes Ds, os parâmetros θ_{cc} , θ_{pa} , θ_{pmp} , θ_{rp} são relacionados com a Ds por meio de funções matemáticas empíricas.

M é definido como a integração da K entre um potencial matricial de referência até o potencial de interesse, conforme a seguinte equação:

$$M = - \int_{h_i}^{h_f} K(h) dh \quad (2)$$

Em que: $K(h)$ é uma função que relaciona a condutividade hidráulica (K) com a tensão matricial (h); h_i é a tensão limite que a água na superfície das raízes pode assumir, comumente considerado como a h do ponto de murcha permanente ($h_i = 15000$ cm); h_f é a tensão até a qual se quer fazer a integração; dh é uma diferença infinitesimal (em integração analítica) ou discreta (em integração numérica). O sinal negativo foi introduzido porque ao se usar tensão ao invés de potencial matricial, dh é um valor negativo, pois $h_f < h_i$. Para obtenção de M para diferentes Ds, a função $K(h)$ precisa ser conhecida em diferentes condições de Ds. Devido à dificuldade de se obter por medições uma função $K(h)$ em todo o intervalo de água disponível, a $K(h)$ foi

estimada pelo modelo teórico de van Genuchten-Mualen, conforme descrito em Jong van Lier; Dourado Neto; Metselaar (2009):

$$K = K_s S_e^\gamma \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (3)$$

Em que: K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado (cm h^{-1}); S_e é a saturação efetiva; γ é um parâmetro empírico ($\gamma = 0,5$) e m é um parâmetro da equação de Van Genuchten (1980) para curva de retenção de água no solo:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{-m} \quad (4)$$

Em que: θ , θ_r e θ_s são os conteúdos volumétricos de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) em um valor particular de h , residual e de saturação, respectivamente; h é a tensão de água no solo (cm); α (cm^{-1}), n e m são coeficientes empíricos de ajuste da equação. Para usar m na equação de estimativa de $K(h)$, m deve ser restrito à condição $m = 1 - (1/n)$.

A K_s é calculada através da equação:

$$K_s = \frac{QL}{A(L+H)} \quad (5)$$

onde Q é o volume de água coletada (mL); L representa a altura da amostra de solo, indicada pela altura do cilindro (cm); A corresponde à seção transversal do cilindro contendo a amostra de solo (cm^2); e H é a carga hidráulica sobre a amostra, ou seja, a altura da lâmina de água sobre a amostra (cm).

A S_e na equação (3) também é função de h :

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{-m} \quad (6)$$

Com isso a equação (3) possibilita caracterizar a função $K(h)$ embora h não esteja explícito nela.

Para obtenção de M com a equação (2) em diferentes D_s , os parâmetros da equação (5) e a K_s devem ser obtidos em amostras de solo com diferentes D_s . Como descrito anteriormente, para obtenção do IHO para diferentes D_s , os parâmetros θ_{cc} , θ_{pa} , θ_{pmp} , θ_{rp} também devem ser obtidos em amostras de solo com diferentes D_s . Por isso, os procedimentos experimentais para obtenção dessas informações são descritos a seguir.

Nos dois locais, 161 amostras de solo (sendo 92 amostras no Argissolo e 69 amostras no Latossolo) com estrutura preservada foram coletadas em anéis metálicos de 0,05 m de altura e 0,06 m de diâmetro, na camada de 0,05 – 0,10 m. Buscou-se coletar amostras em situações de diferentes D_s para permitir obter o IHO e M em diversas condições de compactação do solo. As amostras foram coletadas em uma única camada, pois a intenção foi caracterizar o IHO e M dos solos e não comparar alterações com a profundidade das camadas de solo. No laboratório, o excesso de solo dos anéis foi removido, uma tela permeável foi fixada numa extremidade dos anéis e as amostras foram saturadas numa bandeja, na qual a lâmina de água foi elevada gradualmente até a borda superior dos anéis, durante 48 horas. Posteriormente, as amostras foram drenadas em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006) sob h de 10, 60 e 100 cm, e, em câmaras de Richards, sob h de 330 e 1000 cm (KLUTE, 1986). Na saturação e em cada h , as amostras foram pesadas para determinação de θ . O conteúdo de água na h de 15.000 cm foi determinado através de equações disponíveis em Gubiani et. al. (2012).

Em cada h , 28 amostras (sendo 16 no Argissolo e 12 no Latossolo) eram removidas, pesadas e submetidas ao teste de resistência à penetração (RP). Além dessas, outras amostras com θ menor que o da h de 1000 cm foram usadas para determinação da RP. Para isso, 28 amostras que estavam sob h de 1000 cm na câmara de Richards foram mantidas dentro da sala do laboratório sobre grade afastada 0,05 m da superfície da bancada para que houvesse perda de água por evaporação, monitorada por meio de pesagens. Antes de medir a RP nessas amostras, elas foram mantidas dentro de embalagem plástica por 3 dias para redistribuição do conteúdo de água.

A RP foi medida com um penetrômetro eletrônico de bancada, com haste metálica e cone de 4 mm de diâmetro na base e ângulo de 30°, a uma velocidade constante de 10 mm min⁻¹. Na sequência, as amostras foram secas a 105 °C até

peso constante. Ao conjunto de dados de RP, Ds e θ foi ajustado o modelo não linear proposto por Busscher (1990):

$$RP = a_1 Ds^{b_1} \theta^{c_1} \quad (7)$$

Em que a_1 , b_1 e c_1 são parâmetros de ajuste.

As 49 amostras (sendo 28 no Argissolo e 21 no Latossolo) restantes sob h de 1000 cm na câmara de Richards, nas quais não foi feita a medição da RP, foram usadas para a determinação da K_s com um permeâmetro de carga constante, conforme descrito por Libardi (2005). Na sequência, as amostras foram secas a 105 °C até peso constante.

Individualmente para cada solo, os parâmetros do IHO e o M foram quantificados usando vários procedimentos matemáticos descritos a seguir.

O parâmetro θ_{pa} do IHO foi considerado como o θ que resulta 10% da porosidade total livre de água:

$$\theta_{pa} = \left(1 - \frac{Ds}{Dp} \right) - 0,1 \quad (8)$$

A Dp corresponde à densidade de partículas e foi utilizado o valor médio de 2,65 g cm⁻³.

O parâmetro θ_{cc} do IHO foi considerado como o θ em $h = 100$ cm (θ_{100}), o qual foi relacionado com a Ds por meio de equação linear:

$$\theta_{100} = a_2 Ds + b_2 \quad (9)$$

Em que a_2 e b_2 são parâmetros de ajuste.

O parâmetro θ_{pmp} do IHO foi considerado como o θ em $h = 15000$ cm (θ_{15000}), o qual foi relacionado com a Ds da seguinte maneira:

$$\theta_{15000} = U_{15000} \frac{Ds}{Da} \quad (10)$$

Em que U_{15000} é o conteúdo gravimétrico de água no solo (g g^{-1}) em $h = 15000$ cm e D_a é a densidade da água (1 g cm^{-3}).

A U_{15000} foi calculada por meio de equações publicadas em Gubiani et al. (2012), no qual os autores geraram equações para um conjunto grande de medições de U em uma faixa $5000 < h < 250000$ para os mesmos solos do presente estudo:

$$\text{Para o Argissolo: } U_{15000} = 559h^{-0,3753} \quad (R^2 = 0,95) \quad (11)$$

$$\text{Para o Latossolo: } U_{15000} = 1899h^{-0,1309} \quad (R^2 = 0,85) \quad (12)$$

O parâmetro θ_{rp} do IHO foi considerado como o θ correspondente a uma $RP = 2$ Mpa e relacionado com a D_s rearranjando a equação (7):

$$\theta_{2MPa} = \left(\frac{RP}{a_1 D_s^{b_1}} \right)^{\frac{1}{c}} \quad (13)$$

Com os parâmetros θ_{cc} , θ_{pa} , θ_{pmp} e θ_{rp} de cada amostra de solo foi calculado o IHO aplicando-se a equação (1).

Ao conjunto de pares de dados de (h, θ) de cada uma das 49 amostras nas quais foi medida a K_s , mais o par (h, θ) das equações (11) ou (12), foi ajustada a equação (4). De posse dos parâmetros da equação (4) e da K_s de cada amostra, o M foi calculado também para cada amostra integrando a equação (2) numericamente:

$$M_i = - \sum_{h_{15000}}^{h_i} K(h_i)(h_{i+1} - h_i) \quad (14)$$

Em que a diferença $h_{i+1} - h_i$ foi fixada em $-0,001$ cm, pois $h_{i+1} < h_i$. Para cada h_i da equação (14) obtém-se a Se_i com a equação (6) e a $K(h_i)$ com a equação (3). A integração até dado h_i com a equação (14) resulta um correspondente M_i .

Valores de dM indicam o quanto a condição hídrica do solo é favorável ao movimento de água. Como o interesse deste estudo é avaliar o dM no intervalo de água disponível sob efeito apenas da densidade do solo nos dois solos, foram calculados cinco valores de dM através da equação:

$$dM = -(M_i - M_{i+1}) \quad (15)$$

Os dM calculados foram $dM_{8000-15000}$, $dM_{330-15000}$, $dM_{100-15000}$, $dM_{330-8000}$ e $dM_{100-330}$, que estão distribuídos dentro do intervalo de h que delimita a faixa de água disponível às plantas ($100 < h < 15000$). O cálculo de cada dM foi feito usando o valor de M_i em h_i e o valor de M_{i+1} em h_{i+1} cm. Por exemplo, $dM_{8000-15000} = -(M_{h8000} - M_{h15000})$. Os valores de dM e de IHO foram graficamente apresentados em função da Ds.

Os parâmetros de ajuste das equações (4), (6) e (9) foram obtidos com programa estatístico SAS (SAS INSTITUTE, 1999). Os demais cálculos foram feitos em planilha Excel.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo estão organizados na seguinte sequência: i) limites do IHO e densidade crítica do solo, com análise prévia dos teores limites; ii) variabilidade dos parâmetros obtidos para o cálculo do potencial de fluxo matricial; iii) indicadores de transporte de água K e dM e a relação com o intervalo hídrico ótimo.

6.1 INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO

Para permitir a verificação da variação do M e IHO em função da D_s , buscou-se coletar amostras com variabilidade nos níveis de compactação. Para o Argissolo, a D_s variou de 1,47 a 1,88 g cm^{-3} e para o Latossolo variou entre 1,27 a 1,62 g cm^{-3} .

O θ_{rp} foi o teor limite mais influenciado pela D_s , aumentando potencialmente com o aumento da D_s (Equação 6). O incremento do nível de compactação do solo provoca maior coesão e pontos de fricção entre as partículas do solo, aumentando a RP. Por isso, com o aumento da D_s é necessário que aumente o conteúdo de água no solo para diminuir a coesão e fricção para manter a RP em 2 MPa.

Os valores dos ajustes dos coeficientes das equações constam na Tabela 1. Para o Argissolo, a equação (8) não foi significativa, indicando que o θ_{cc} não esteve relacionado com a D_s no intervalo de D_s das amostras coletadas (Tabela 1). Assim, o θ_{cc} foi considerado igual ao valor médio de θ_{100} (0,253 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), que corresponde à constante b_2 da equação linear, sendo $a_2 = 0$. A falta de relação entre D_s e θ_{cc} não é algo comum, de modo que é mais frequente o θ_{cc} aumentar com o incremento na D_s , a exemplo dos trabalhos de Junior et al. (2012), Kaiser et al. (2009), Silva; Kay; Perfect (1994) e Tormena; Silva; Libardi (1998).

Para o Latossolo, a equação (8) foi significativa. O θ_{cc} teve relação positiva com o aumento da D_s , variando de 0,39 a 0,42 g cm^{-3} , estando de acordo com os conteúdos de água na capacidade de campo obtidos por Gubiani (2012) para o mesmo solo.

O θ_{pa} evidentemente reduziu com o aumento da D_s , conforme pode ser deduzido da equação 7, a qual indica que quanto maior a D_s , menor o espaço poroso total do solo, e, por consequência, menor o θ para que se mantenha uma porosidade de aeração crítica de 0,10 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

Tabela 1 - Parâmetros ajustados para a equação da resistência do solo à penetração (RP) em função da umidade volumétrica do solo (θ) e da densidade do solo (Ds) (Equação 6) e da equação para o conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{cc}) em função da Ds (Equação 8).

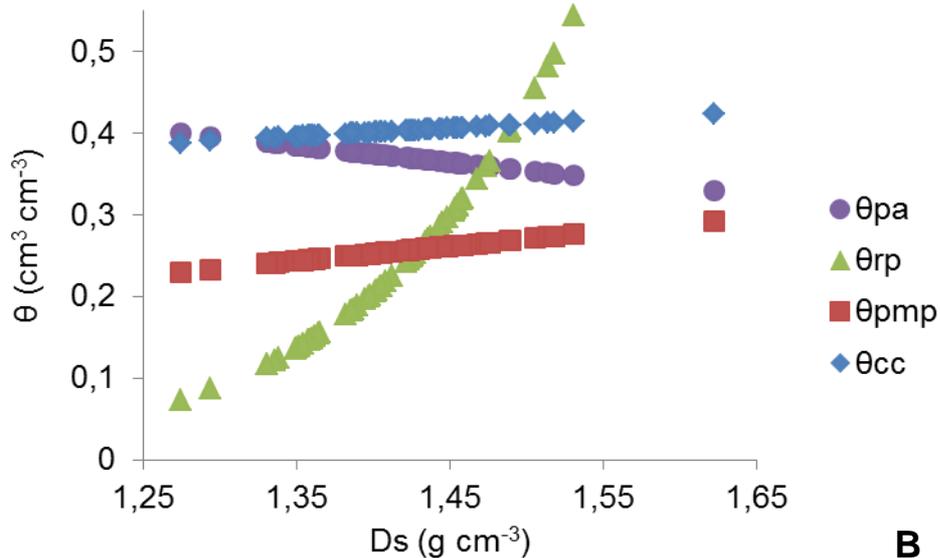
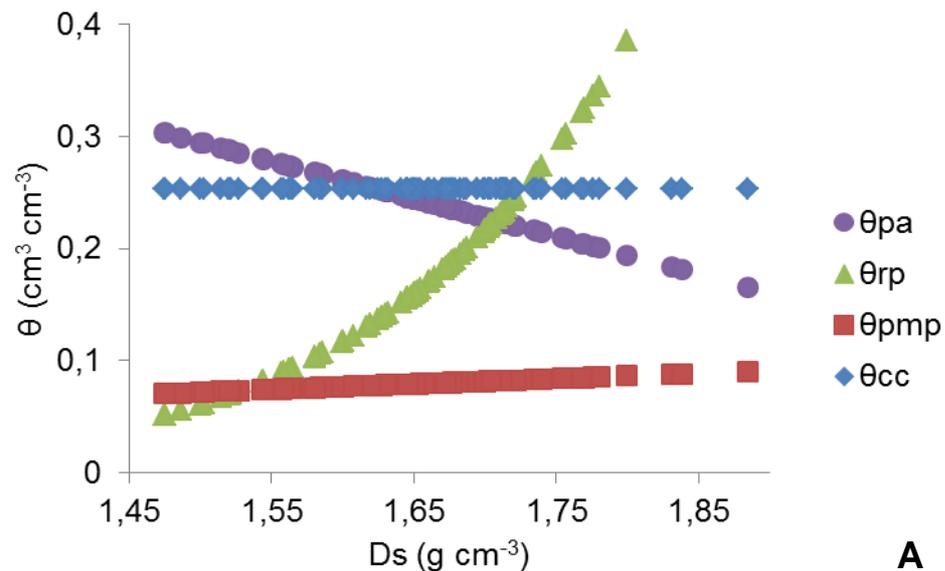
Equação 6			Equação 8	
$RP = a_1 Ds^{b_1} \theta^{c_1}$			$\theta_{100} = a_2 Ds + b_2$	
a_1	b_1	c_1	a_2	b_2
Argissolo				
0,0454	5,5498	-0,5490	0	0,253
	N: 64	$R^2: 0,89$	N: 92	$R^2: 0,0062$
Latossolo				
0,4013	3,3391	-0,3037	0,102	0,2589
	N: 48	$R^2: 0,87$	N: 69	$R^2: 0,1531$

N: Tamanho da amostra.

O θ_{pmp} teve relação positiva com a Ds, resultando em incremento no conteúdo de água com o aumento do nível de compactação do solo para ambos os solos. Para o Argissolo, o θ_{pmp} variou entre 0,07 e 0,09 g cm⁻³, valores semelhantes aos obtidos por Kaiser (2010) para o mesmo solo. Para o Latossol, a variação foi entre 0,23 e 0,29 g cm⁻³, também semelhante ao obtido por Gubiani (2012). Essa diferença entre os solos pode ser atribuída a maior quantidade de poros pequenos e área superficial específica existentes no Latossolo em relação ao Argissolo.

Os IHOs gerados com o uso da equação 1 para o Argissolo e para o Latossolo constam na Figura 3.

Figura 3 - Diagrama do intervalo hídrico ótimo gerado para o Argissolo (A) e para o Latossolo (B). Os símbolos da legenda representam o conteúdo de água para uma porosidade de aeração de 10% (θ_{pa}), resistência do solo à penetração de 2 MPa (θ_{rp}), capacidade de campo a 100 cm (θ_{cc}) e ponto de murcha permanente a 15000 cm (θ_{pmp}).



O IHO para o Argissolo teve seu limite superior definido pelo θ_{cc} até a D_s de $1,62 \text{ g cm}^{-3}$, a partir da qual passou a ser definido pelo conteúdo de água na porosidade de aeração limite de $0,1 \text{ cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$. O limite inferior foi definido pelo θ_{pmp} até a D_s de $1,53 \text{ g cm}^{-3}$, e após isso, foi definido pelo θ no qual a RP foi de 2 MPa. A densidade do solo crítica (D_{sc}) foi de $1,71 \text{ g cm}^{-3}$, próximo ao obtido por Kaiser

(2010), a qual foi de $1,75 \text{ cm}^{-3}$. Conceitualmente, a partir desta D_s , o IHO é igual a zero e as plantas teriam maior dificuldade em se desenvolver.

Da mesma forma que no Argissolo, o teor limite superior do IHO no Latossolo foi definido pelo θ_{cc} até a D_s de $1,32 \text{ g cm}^{-3}$, e a partir deste, pelo θ_{pa} . O limite inferior foi definido pelo θ_{pmp} até a D_s de $1,43 \text{ g cm}^{-3}$, e após isso, foi definido pelo θ_{rp} . A D_{sc} foi de $1,48 \text{ g cm}^{-3}$, inferior ao valor de $1,32 \text{ g cm}^{-3}$, obtido por Gubiani (2012). Kaiser et al. (2009) encontraram a D_{sc} de $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ para um Latossolo argiloso de granulometria semelhante (607 g kg^{-1} de argila) a do estudado nesta dissertação (640 g kg^{-1} de argila). As variações podem ocorrer devido a diferenças no teor de argila, conforme indica a relação direta obtida por Reichert et al. (2009) entre o teor dessa fração mineral e a densidade crítica obtida pelo IHO ($D_{sc} = -0,00078 * \text{Argila} + 1,83803$ ($R^2 = 0,92$), com argila em g Kg^{-1}), pela qual a D_{sc} do Latossolo em estudo seria de $1,34 \text{ g cm}^{-3}$.

6.2 VARIABILIDADE DOS PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DO POTENCIAL DE FLUXO MATRICIAL

A variação da D_s no Argissolo ($1,47$ a $1,88 \text{ g cm}^{-3}$) e no Latossolo ($1,27$ a $1,62 \text{ g cm}^{-3}$) possibilitou ampla variação nos parâmetros do modelo de Van Genuchten e na K_s (Tabela 2), que, exceto o α , são parâmetros usados para a obtenção da função $K(h)$, com a qual é calculado o M . Embora a variabilidade do parâmetro n tenha sido relativamente baixa, a grande variabilidade de θ_s e K_s , por efeito da D_s , garante variabilidade na função $K(h)$ e efeito da D_s no cálculo de M (discutido mais adiante).

A grande variabilidade da K_s , indicada pelo elevado CV (%), também foi observada em outros trabalhos. Tal fato se deve à variabilidade espacial e natural do solo, como, por exemplo, onde uma amostra pode conter bioporos e outra não, e assim, a que contém bioporos, pode apresentar K_s superior a outras de mesma D_s sem bioporos (EGUCHI; SILVA; OLIVEIRA, 2003).

Tabela 2 – Estatística descritiva dos parâmetros do modelo de Van Genuchten para a curva de retenção de água e da condutividade hidráulica do solo saturado para o Argissolo e Latossolo.

Estatística	θ_s^*	θ_r	α	n	K_s
Argissolo					
Média	0,343	0	0,025	1,247	6,138
Mediana	0,347	0	0,023	1,239	2,117
Mínimo	0,294	0	0,008	1,206	0,241
Máximo	0,386	0	0,040	1,357	29,585
CV (%)	5,90	0	33,91	2,33	146,11
N	44	44	44	44	28
Latossolo					
Média	0,475	0	0,062	1,09	6,333
Mediana	0,475	0	0,045	1,09	1,383
Mínimo	0,449	0	0,011	1,071	0,365
Máximo	0,509	0	0,208	1,124	53,778
CV (%)	3,68	0	92,14	1,03	220,80
N	33	33	33	33	21

* θ_s e θ_r são os conteúdos de água volumétricos ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) de saturação e residual, respectivamente; α (cm^{-1}) e n são coeficientes empíricos de ajuste da equação da curva de retenção de água; K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado (cm h^{-1}); N é o número de amostras.

Optou-se por não apresentar todos os 77 gráficos da CRA, e 49 da K e do M, porque ocuparia muito espaço e por não serem os gráficos em si a informação mais relevante deste estudo. Porém, para auxiliar no entendimento da relação existente do M com a CRA, Se e K, bem como exemplificar a obtenção de M e dM, o conjunto de gráficos de uma única amostra foi apresentado (Figura 4). A amostra utilizada foi do Argissolo com D_s de $1,65 \text{ g cm}^{-3}$, valor intermediário ao das amostras coletadas.

O gráfico apresenta, de cima para baixo, a sequência das determinações e cálculos realizados para cada amostra de solo na qual foi determinada a K_s . Iniciou-se com a construção da CRA, a qual foi ajustada pelo modelo de Van Genuchten (Equação 4), obtendo-se os parâmetros de ajuste, os quais estão descritos estatisticamente na Tabela 2. De posse destes parâmetros calculou-se a Se em

cada potencial matricial (Equação 5). Com a K_s e a Se foi obtida a curva de K (Equação 3) que, conforme descrito na metodologia, é uma função $K(h)$.

Uma vez obtida a curva $K(h)$, obteve-se a curva de M (Equação 2). Na Figura 4 está exemplificado o cálculo de um valor de M : M_i para o ponto i , em que $K_i(h_i)$. O dM foi ilustrado no quarto gráfico de cima para baixo (Figura 4).

Relembrando o que foi descrito na metodologia, o procedimento de obtenção de dM foi aplicado para o cálculo de $dM_{8000-15000}$, $dM_{330-15000}$, $dM_{100-15000}$, $dM_{330-8000}$ e $dM_{100-330}$, os quais estão representados graficamente em função da D_s no item 6.3. Também cabe lembrar que M foi calculado para cada intervalo de 1 cm de h , o que resultou 14900 valores de M para cada amostra de solo.

O dM para diferenças de h de 1cm, se correlacionou positivamente com a D_s (Tabela 3). A diferença entre r mínimo e máximo foi pequena, indicando que a relação dM e D_s foi pouco dependente do potencial matricial, ou seja, r mudou pouco de um dM calculado em tensão matricial de 15000 cm para outro dM calculado em tensão matricial de 100 cm.

O coeficiente r foi superior no Argissolo, indicando que o dM deste solo é mais afetado pela D_s . Supondo-se que o dM ocorra a uma mesma distância dx para ambos os solos, a densidade de fluxo de água ($q_i = -dM/dx$) seria mais favorecida no Argissolo que no Latossolo pelo aumento do nível de compactação. Uma suposição para isso é que o aumento da D_s aumenta mais a proporção de microporos no Argissolo em relação ao Latossolo.

Figura 4 – Exemplo dos gráficos da CRA ($U_v(h)$), saturação efetiva ($S_e(h)$), condutividade hidráulica ($K(h)$) e potencial de fluxo matricial ($M(h)$), de uma amostra do Argissolo.

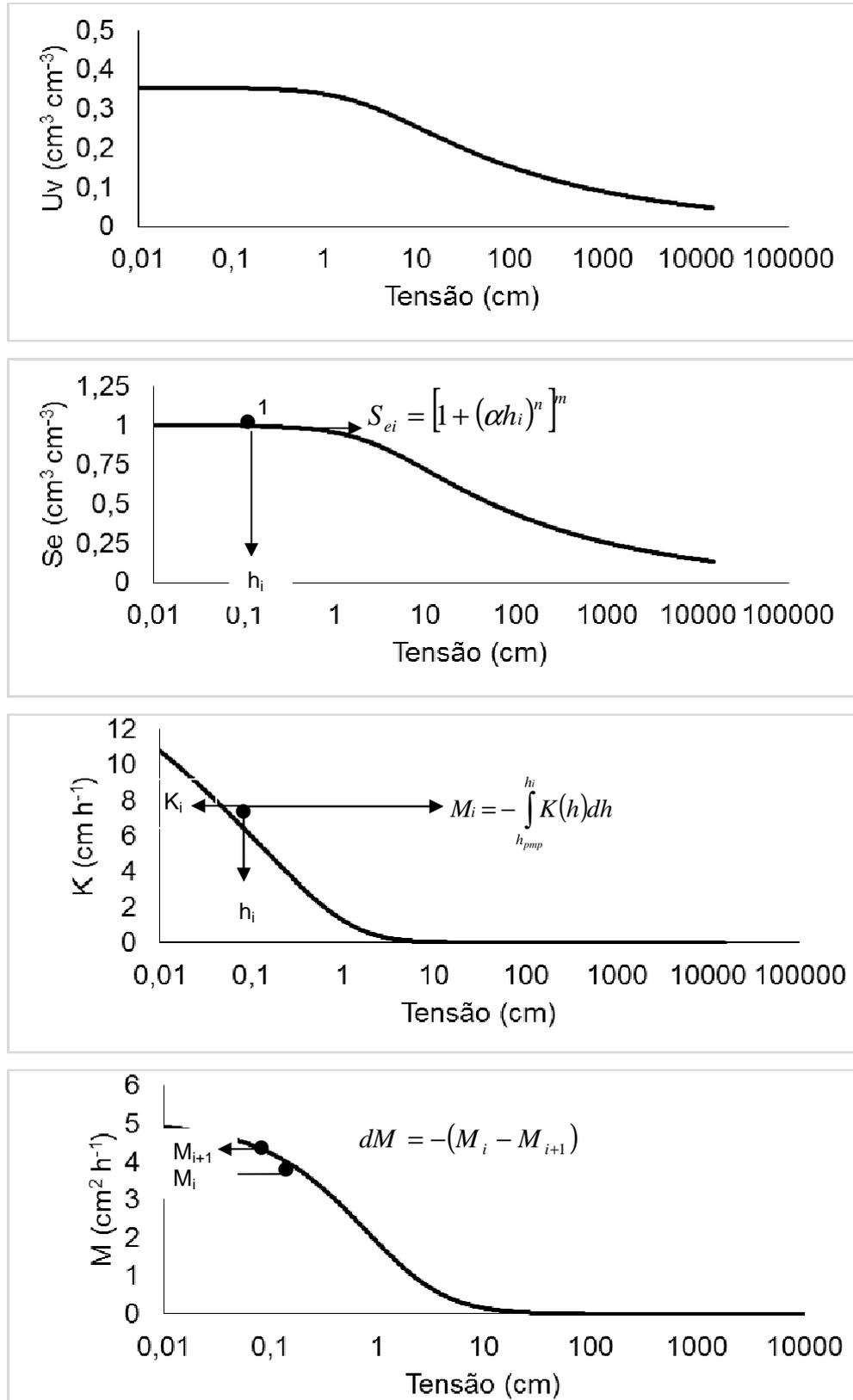


Tabela 3 – Estatísticas descritivas do coeficiente de correlação de Pearson (r) entre dM e densidade do solo dentro do limite de água disponível.

Solo	N	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
Latossolo	14900	0,343	0,002	0,338	0,345
Argissolo	14900	0,465	0,001	0,465	0,468

Os trabalhos encontrados na literatura envolvendo transporte de água no solo, em geral, são sobre a K, e em alguns desses, foi feita a análise de correlação da K com a D_s. Devido, provavelmente à variabilidade natural que esta propriedade possui, bem como, alterações na estrutura durante a coleta e pelos diferentes métodos de determinação, muitos trabalhos não observaram essa correlação (FERREIRA, 2008; GUIMARÃES, 2000). Porém, em outro trabalho, realizado próximo à área de estudo desta dissertação, foi observada correlação significativa de -0,79 (5%) entre a K_s e a D_s no horizonte Ap de um Argissolo Vermelho (PEREIRA et al., 2008).

Em muitos trabalhos foi realizado o cálculo de M, seja através de ensaios com evaporação e medição da K diretamente ou com metodologia semelhante a deste trabalho (JONG VAN LIER; METSELAAR; VAN DAM, 2006; JONG VAN LIER et al., 2013; JONG VAN LIER; VAN DAM; METSELAAR, 2009; ROCHA et al., 2010), e relacionando com conteúdo de água e potencial matricial (JONG VAN LIER; METSELAAR; VAN DAM, 2006; ROCHA et al., 2010), comparando solos de texturas diferentes (JONG VAN LIER; METSELAAR; VAN DAM, 2006; JONG VAN LIER; VAN DAM; METSELAAR, 2009; ROCHA et al., 2010), ou ainda, para utilizá-los na geração de modelos matemáticos para processos como, por exemplo, a extração de água pelas raízes (ROCHA et al., 2010), estimar a combinação do estresse hídrico com osmótico, relacionando com a taxa de transpiração relativa (JONG VAN LIER; VAN DAM; METSELAAR, 2009), entre outros (JONG VAN LIER et al., 2013). No entanto, não foram encontrados trabalhos que avaliassem a correlação de M ou dM com a D_s, ou relacionassem eles com o IHO, como realizado neste estudo.

6.3 RELAÇÃO ENTRE VARIAÇÃO NO POTENCIAL DE FLUXO MATRICIAL E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E O INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO

Os valores de M foram aproximadamente 10 vezes maiores no Argissolo em relação ao Latossolo. Da mesma forma, os valores de dM também foram superiores no Argissolo (Figura 5) em relação ao Latossolo (Figura 6) como visto no item anterior.

Em ambos solos, o dM aumentou positivamente com o aumento da Ds, independentemente da faixa limite de h considerada. Analisando conjuntamente com o IHO, pode-se ver que dM e IHO estão inversamente relacionados, ou seja, o aumento de dM é acompanhado por redução no IHO e vice-versa. Assim, com o aumento da Ds, o IHO indica que a condição inadequada vai ganhando proporções maiores em relação a condição hídrica adequada, ao passo que o dM indica que a condição hídrica vai ficando mais favorável ao fluxo de água. Essa era uma das expectativas motivadoras deste estudo, e que indica que este indicador de transporte de água poderá auxiliar no entendimento do motivo pela qual as plantas conseguem ter maior rendimentos de grãos em condições hídricas supostamente menos favoráveis com base no IHO.

Jong Van Lier; Metselaar; Van Dam (2006) afirmaram que o M é um parâmetro conveniente para definir a condição hidráulica limitante do solo, com aplicabilidade mais adequada que a K, pois ele combina ambos os fatores que determinam o fluxo de água no solo. Os autores encontraram relação linear entre M e transpiração potencial, onde a inclinação da reta é dada pela densidade radicular, de forma que quanto menor a densidade radicular, mais elevado o valor do M limitante. Da mesma forma, se a demanda atmosférica for elevada, a taxa com que a água flui até a raiz deve ser compatível, pois do contrário, mesmo que o conteúdo de água esteja dentro dos limites do IHO, é possível ocorrer déficit hídrico. Assim, pode-se inferir que, indicadores de fluxo de água auxiliam na interpretação e previsão de ocorrência de déficit hídrico, porém, dependente da estrutura e funcionalidade do sistema radicular.

Trabalhos publicados já sugeriram a utilização de indicadores de transporte de água como propriedades limitantes do IHO, em especial no seu limite inferior, tais como a condutividade hidráulica (HÅKANSSON; LIPIEC, 2000) e o potencial de fluxo

matricial (JONG VAN LIER; VAN DAM; METSELAAR, 2009), complementarmente ou em substituição aos teores de água da definição atual do IHO.

Durigon; Jong Van Lier (2011) ao calcularem a condutividade hidráulica em amostras de um Nitossolo, com diferentes Ds (1,163, 1,193 e 1,105 g cm⁻³), observaram que a Ds intermediária de 1,163 g cm⁻³ foi a que apresentou maiores valores absolutos de K quando calculada tanto em função do conteúdo de água quanto da tensão matricial para tensões próximas as do θ_{cc} . No entanto, para tensões matriciais próximas de 15.000 cm, a K foi superior para o solo de maior Ds, indicando que o movimento de água foi facilitado com o aumento do nível de compactação do solo. Também, Durigon et al. (2011), estudando a medição da K com tensiômetros de polímeros próximo ao ponto de murcha permanente, encontraram valores de K e de conteúdo de água maiores no solo mais adensado em relação ao mesmo solo com menores Ds. Embora os autores não tenham calculado o M, pode-se inferir que seu valor seria superior no solo com maior Ds, uma vez que o M corresponde à integral da K (h).

Considerando as divergências observadas entre o que se esperava do IHO, enquanto indicador de qualidade física do solo e resposta em rendimento de grãos, com os resultados obtidos nos trabalhos já citados nesta dissertação, além do aumento da facilidade de transporte de água em função do aumento da Ds, observado neste trabalho, pode-se inferir que os indicadores de transporte de água, M e K, podem ser úteis na interpretação de disponibilidade de água às plantas, podendo ser utilizado juntamente com o IHO. No entanto, cabem novas pesquisas para verificar qual é o limite em que o fluxo de água consegue compensar os efeitos causados pelo aumento da compactação na estrutura do solo, e assim, buscar maior correlação com o rendimento das culturas.

Tabela 4 – Estatísticas descritivas do coeficiente de correlação de Pearson (r) entre dM e densidade do solo dentro de diferentes faixas de potencial matricial.

Solo	N	dM (cm ² h ⁻¹)				
		dM ₈₀₀₀₋₁₅₀₀₀	dM ₃₃₀₋₁₅₀₀₀	dM ₁₀₀₋₁₅₀₀₀	dM ₃₃₀₋₈₀₀₀	dM ₁₀₀₋₃₃₀
Latossolo	5	0,345	0,339	0,338	0,339	0,338
Argissolo	5	0,466	0,466	0,467	0,466	0,468

Figura 5 – Relação do IHO do Argissolo com o dM (em escala logarítmica de base 10) para os intervalos $dM_{8000-15000}$, $dM_{330-15000}$, $dM_{100-15000}$, $dM_{330-8000}$ e $dM_{100-330}$.

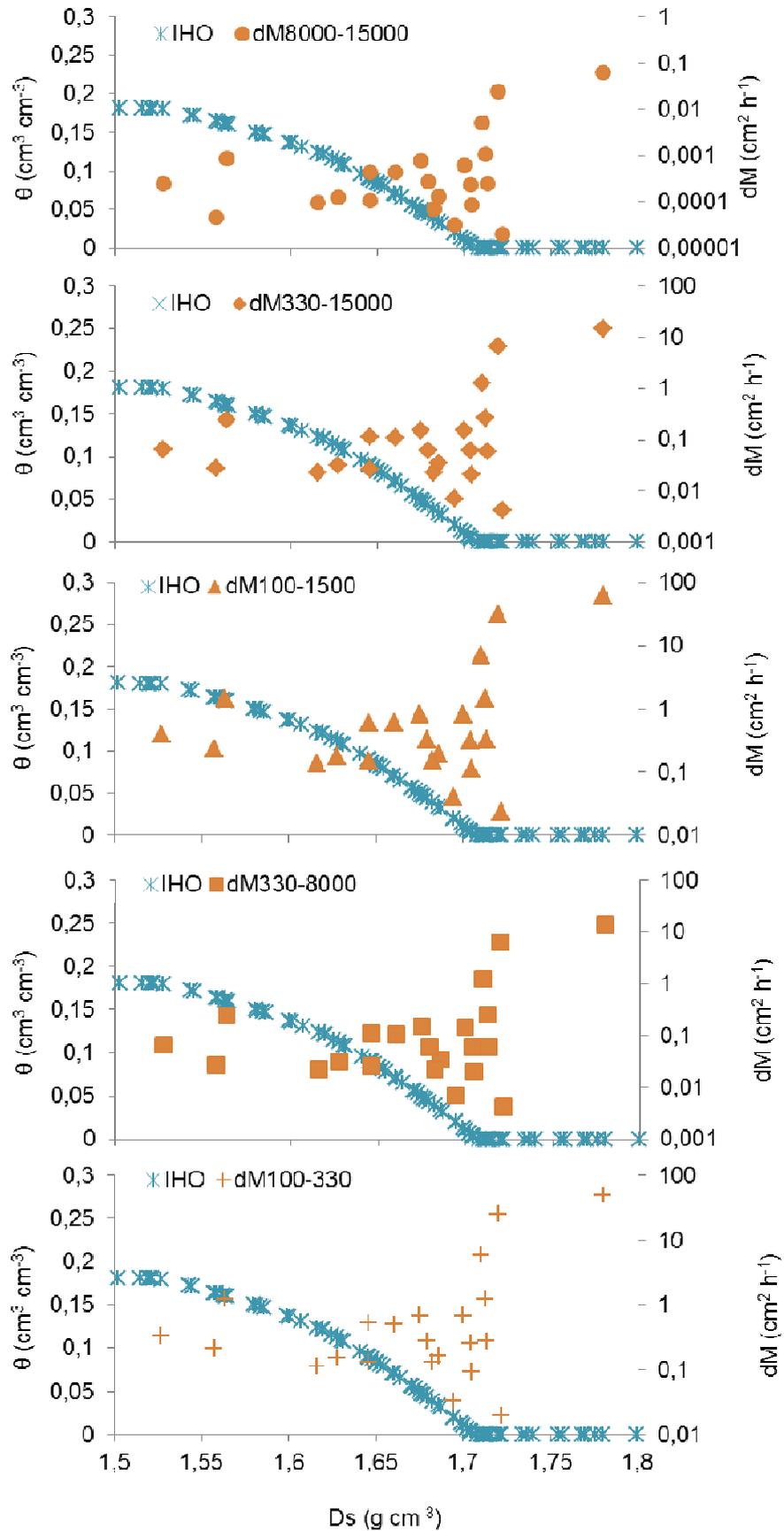
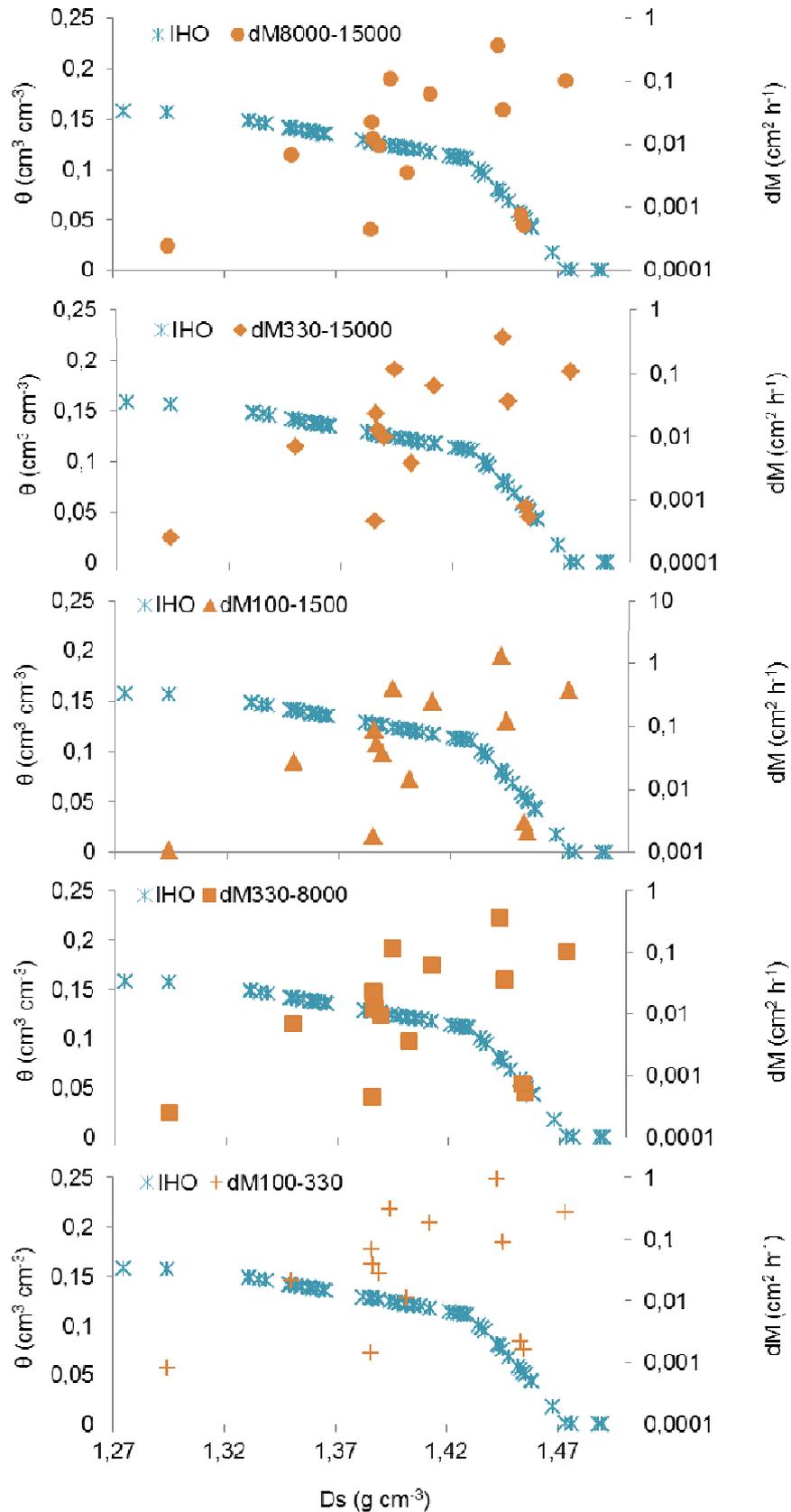


Figura 6 - Relação do IHO do Latossolo com o dM (em escala logarítmica de base 10) para os intervalos $dM_{8000-15000}$, $dM_{330-15000}$, $dM_{100-15000}$, $dM_{330-8000}$ e $dM_{100-330}$



Os valores de K em cada tensão (K_{100} , K_{330} , K_{8000} e K_{15000}) também foram aproximadamente 10 vezes maiores no Argissolo (Figura 7), em relação aos do Latossolo (Figura 8).

A relação entre K e Ds é positiva em ambos os solos, porém, estatisticamente significativa ($P < 0,05$) apenas para o Argissolo. A relação positiva entre K e Ds mostra que a capacidade do solo em conduzir água aumenta com o aumento do nível de compactação. Isso se deve, provavelmente, à redistribuição de tamanho de poros, com diminuição dos macroporos e aumento dos microporos (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007) que ficam preenchidos com água, aumentando a área útil para o fluxo (RICHARD et al., 2001), bem como maior contato entre agregados e aproximação das partículas, o que favorece a formação de filmes de água em seu entorno e continuidade para o fluxo de água através dos mesmos (CARMINATI et al., 2008; HILLEL, 1998).

Apesar de a Ds influenciar positivamente a K, é importante observar que o valor absoluto de K diminui do K_{100} até o K_{15000} , e essa variação é mais pronunciada no Argissolo em relação ao Latossolo, o que pode ser atribuído ao maior conteúdo de água no potencial matricial de 15000 cm do Latossolo em relação ao Argissolo. Ainda, o maior teor de argila, além de reter mais água na faixa de potencial matricial próximo ao ponto de murcha permanente, devido à maior área superficial específica, é responsável por parte do fluxo de água nesta faixa de potencial, pois as partículas da fração argila são recobertas por filmes de água, pelas quais ocorre o movimento da água (HILLEL, 1998).

Os resultados encontrados neste trabalho, onde o fluxo de água é favorecido pelo aumento da Ds, podem ser uma provável explicação da falta de correlação entre IHO e rendimento de grãos, a exemplo do que foi observado por Gubiani (2012) e Kaiser (2010). Gubiani (2012) encontrou correlações positivas entre variáveis de medidas de plantas de milho (altura de plantas, profundidade efetiva do sistema radicular e índice de área foliar) e IHO, o que atende ao pressuposto de que o IHO indica qualidade física do solo (quanto maior o IHO, maior qualidade física do solo e, assim, maior crescimento radicular e da parte aérea). No entanto, a correlação encontrada por Gubiani (2012) entre rendimento de grãos e IHO foi negativa e não significativa, mostrando que maiores valores de IHO não necessariamente estão associados com maiores produtividades, e que o pressuposto do IHO enquanto indicador de qualidade física do solo não se aplica

para produtividade de grãos. Da mesma forma, Kaiser (2010) observou o efeito negativo do aumento da compactação sobre o crescimento radicular, no entanto, não observou o mesmo sobre a produção de grãos.

Analisando o exposto sobre os resultados de Kaiser (2010) e Gubiani (2012), pode-se supor que as melhorias no fluxo de água no solo podem ter compensado o menor conteúdo de água no solo, compreendido dentro dos limites do IHO, bem como a menor exploração de solo pelas raízes ou densidade radicular. Em relação ao sistema radicular, em termos práticos, as plantas com sistema radicular pouco desenvolvido ou deficiente na absorção de água devido problemas fitossanitários ou com ataque de pragas, precisam que a K ou dM seja superiores ao de lavouras bem estabelecidas e saudáveis, para evitar déficit hídrico. Para verificar se, de fato, essa compensação ocorreu nos dois estudos que motivaram o desenvolvimento desta pesquisa, e que, essa é uma explicação pela falta de correlação entre IHO e rendimento de grãos e desenvolvimento de plantas, devem ser realizados novos ensaios envolvendo plantas e aumentar o banco de dados dos valores dos indicadores, principalmente do Latossolo, e neles, fazer a correlação das variáveis relacionadas às plantas com os indicadores de transporte de água no solo.

Tabela 5 – Estatísticas descritivas do coeficiente de correlação de Pearson (r) entre K e densidade do solo nos potenciais matriciais de 100, 330, 8000 e 15000 cm.

Solo	N	K (cm h ⁻¹)			
		K ₁₅₀₀₀	K ₈₀₀₀	K ₃₃₀	K ₁₀₀
Latossolo	4	0,345	0,344	0,338	0,338
Argissolo	4	0,466	0,465	0,466	0,468

Figura 7 - Relação do IHO do Argissolo com a K (em escala logarítmica de base 10) nas tensões de 100 cm (K_{100}), 330 cm (K_{330}), 8000 cm (K_{8000}) e 15000 cm (K_{15000}).

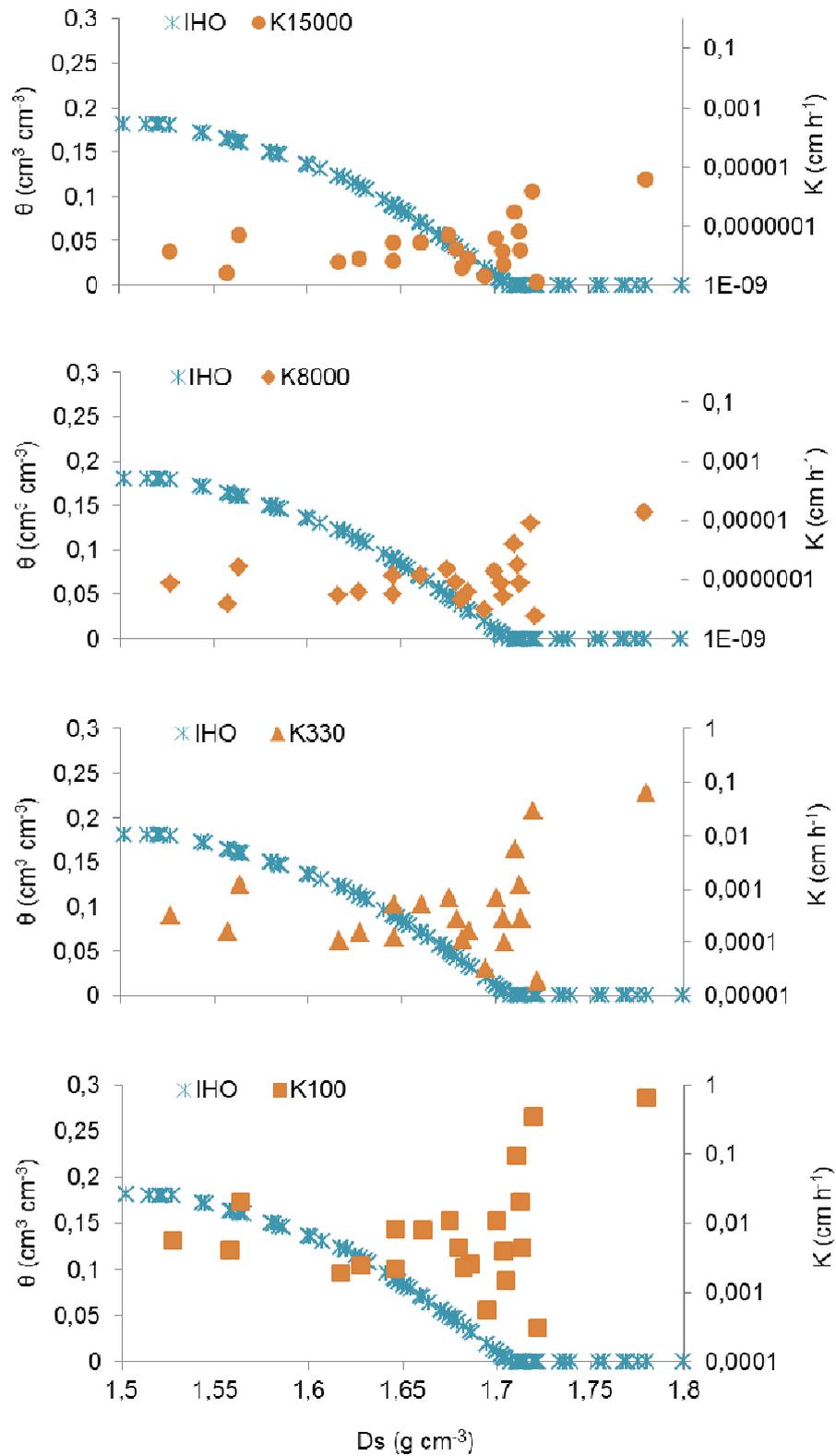
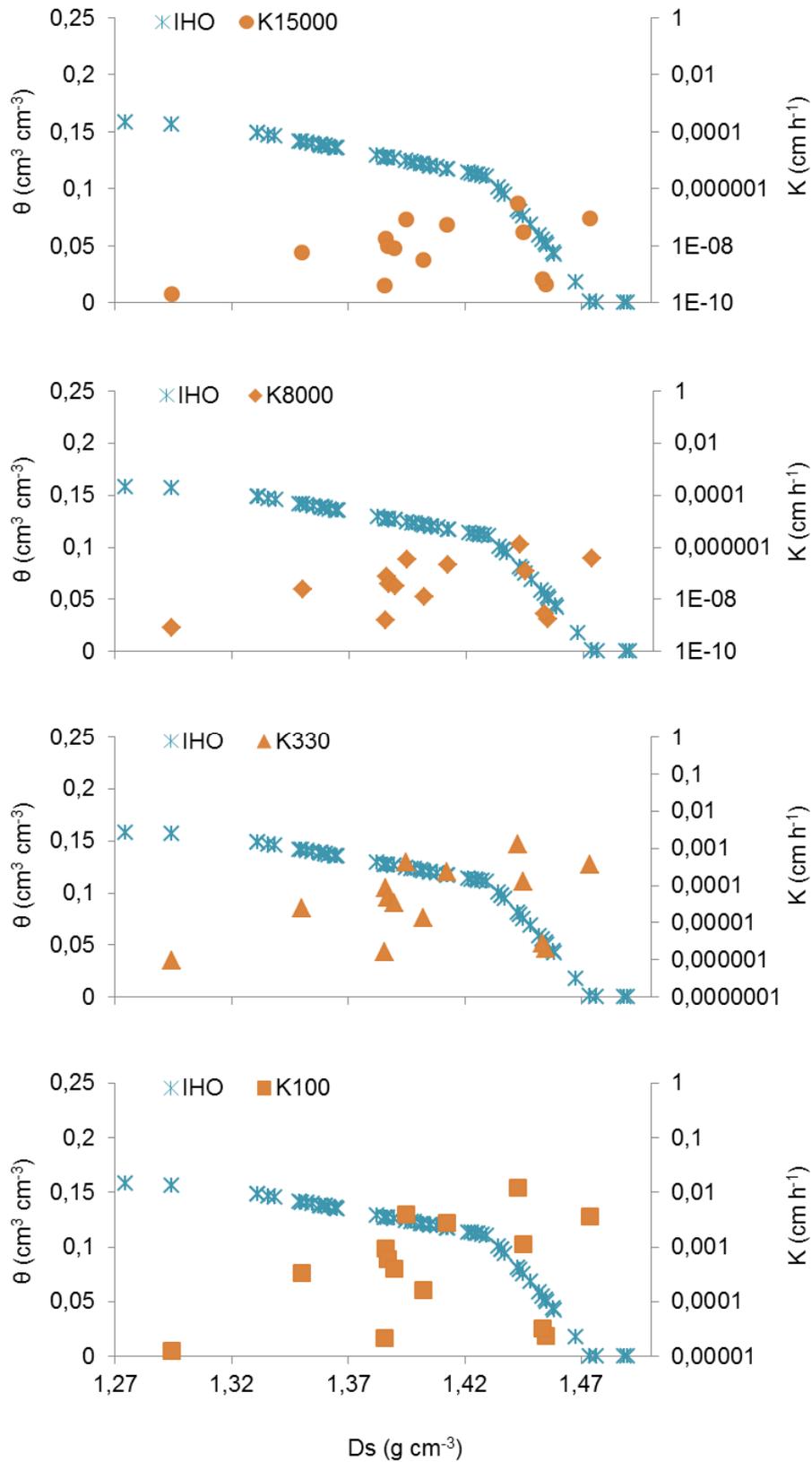


Figura 8 - Relação do IHO do Latossolo com a K (em escala logarítmica de base 10) nas tensões de 100 cm (K_{100}), 330 cm (K_{330}), 8000 cm (K_{8000}) e 15000 cm (K_{15000}).



7 CONCLUSÃO

O variação do potencial de fluxo matricial (dM) entre diferentes faixas de tensão e a condutividade hidráulica (K) calculada em potenciais matriciais dentro do limite de água disponível aumentaram com o aumento da densidade do solo, indicando melhoria na capacidade do solo em conduzir água, mesmo em densidades maiores que a densidade do solo crítica calculada com o IHO. Esses resultados sugerem que o aumento da compactação favorece o fluxo de água na faixa de água disponível às plantas e pode ser um fator importante para o entendimento de por que plantas produzem mais em condições supostamente menos favoráveis em termos de IHO.

O IHO, além de não ser capaz de indicar disponibilidade por restrição de fluxo, ele ainda indica decréscimo de disponibilidade hídrica sem considerar que a condição hídrica do solo fica mais favorável ao movimento de água com o aumento da D_s . Estudos com plantas para avaliar quanto o incremento no transporte de água pode compensar a redução no crescimento de raízes por resistência mecânica com o aumento da compactação seriam de grande utilidade para melhorar a interpretação do IHO e da resposta das culturas à compactação do solo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERGAMASCHI, H. et al. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 9, p. 831-839, set. 2004.

BEUTLER, A. N. et al. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 639–645, jul./set. 2006.

BEUTLER, A.N. et al. Soil compaction by machine traffic and Least Limiting Water Range related to soybean yield. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1591-1600, Nov. 2008.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, Michigan, v. 33, n. 2, p. 519-524, Mar./Apr. 1990.

CARMINATI, A. et al. Unsaturated water flow across soil aggregate contacts. **Advances in Water Resources**, Southampton, v. 31, n. 9, p. 1221-1232, Sept. 2008.

COLLARES, G.L. et al. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, nov. 2006.

DRAYE, X. et al.. Model-assisted integration of physiological and environmental constraints affecting the dynamic and spatial patterns of root water uptake from soils. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 61, n. 8, p. 2145-2155, Mar. 2010.

DURIGON, et al. Measuring hydraulic conductivity to wilting point using polymer tensiometers in an evaporation experiment. **Vadose Zone Journal**, v. 10, p. 741-746, 2011.

DURIGON, A.; JONG VAN LIER, Q. de. Determinação das propriedades hidráulicas do solo utilizando tensiômetros de polímeros em experimentos de evaporação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 1271-1276, jul./ago. 2011.

EGUCHI, E. S.; SILVA, E. L.; OLIVEIRA, M. S. Variabilidade da condutividade hidráulica do solo saturado e da taxa de infiltração básica determinadas “in situ”. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, edição especial, p. 1607–1613, dez. 2003.

EMBRAPA/CNPS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed. Brasília: Embrapa, 2006, 306 p.

EMBRAPA. **Ecofisiologia da Soja**. Circular Técnica, 48. Embrapa Soja, Londrina, 2007.

- FERREIRA, S. T. **Avaliação da relação entre a condutividade hidráulica do solo saturado com parâmetros físicos de um Latossolo Vermelho distrófico submetido a dois diferentes manejos.** 2008. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciência – Física) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2008.
- FORSYTHE, W. M. Las propiedades físicas, los factores físicos de crecimiento y la productividad del suelo. **Fitotecnia Latino Americana**, v. 4, p.165-176, 1967.
- FREDDI, O. da S., et al. Compactação do solo e Intervalo Hídrico Ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 3, p. 477-486, jul./set. 2007.
- GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p.1174-1184, set./out. 2013.
- GUBIANI, P. I. **Tempo para a ocorrência da resistência à penetração restritiva ao feijoeiro em solo com diferentes estados de compactação.** 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo – Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- GUBIANI, P. I. **Regularidade de resposta da cultura do milho à compactação do solo.** 2012. 152 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo - Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.
- GUBIANI, P. I. et al. Assessing Errors and Accuracy in Dew-Point Potentiometer and Pressure Plate Extractor Measurements. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, USA, v. 77, p. 19-24, Dec. 2012.
- GUBIANI, P. I. et al. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p.1502-1511, 2013.
- GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho escuro textura argilosa da região do Cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional.** 2000. 112 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola - área de concentração: água e solo) – Universidade Federal de Campinas, Campinas, 2000.
- HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, n. 2, p. 71-85, Jan., 2000.
- HILLEL, D. **Environmental soil physics.** New York: Academic Press, 1998.
- HURTADO, A. L. B., CICHOTA, R., JONG VAN LIER, Q. Parametrização do método do perfil instantâneo para a determinação da condutividade hidráulica do solo em experimentos com evaporação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 301-307, mai./abr. 2005.

JONG VAN LIER, Q. Disponibilidade de água as plantas. In: VAN LIER, Q. de J. (Org.). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, 2010, p. 283-298.

JONG VAN LIER, Q.; DOURADO NETO, D.; METSELAAR, K. Modeling of transpiration reduction in van Genuchten–Mualem type soils. **Water Resources Research**, Washington, v. 45, p. 1-9, Feb. 2009.

JONG VAN LIER, Q. et al. Modeling Water Potentials and Flows in the Soil–Plant System Comparing Hydraulic Resistances and Transpiration Reduction Functions. **Vadose Zone Journal**, v. 12, p. 1-20, Aug. 2013.

JONG VAN LIER, Q.; GUBIANI, P. I. Beyond the Least Limiting Water Range: rethinking soil physics research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 925-939, 2015.

JONG VAN LIER, Q.; METSELAAR, K.; VAN DAM, J. C. Root Water Extraction and Limiting Soil Hydraulic Conditions Estimated by Numerical Simulation. **Vadose Zone Journal**, v. 05, p. 1264–1277, Nov. 2006.

JONG VAN LIER, Q.; VAN DAM, J. C.; METSELAAR, K. Root Water Extraction under Combined Water and Osmotic Stress. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 3, p. 862-875, May/June. 2009.

JUNIOR, E.B. et al. Intervalo Hídrico Ótimo e Grau de Compactação de um Latossolo Vermelho Após 30 Anos Sob Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 971-982, mai./jun. 2012.

KAISER, D. R. **Estrutura e água em Argissolo sob distintos preparos na cultura do milho**. 2010. 151 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo Solo - Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

KAISER, D.R. et al. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 845-855, jul./ago. 2009.

KIRKHAM, M.B. **Principles of soil and plant water relations**. New York: Academic Press, 2005. 500p.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 221-227, mar./abr., 2007.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C.A., ed. **Methods of soil analysis**. I. Physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 635-662.

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

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335p.

LIBARDI, P. L. Água no solo. In: VAN LIER, Q. de J. (Org.). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p.103-152, 2010.

MORAES, M. T. de et al. Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 288-298, jan./fev. 2014.

PEREIRA, T. I. et al. Condutividade Hidráulica Saturada e propriedades físicas do solo em área de pastagem degradada em Argissolo na Depressão Central do RS. **VII Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo**, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008.

RAMOS, F. T. et al. Correlation of the least limiting water range with soil physical attributes, nutrient levels and soybean yield. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10(21), p. 2240-2247, May. 2015.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 12, p. 211-216, 1988.

REICHERT, J.M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v.102, p.242–254, Mar. 2009.

REICHERT, J. M. et al. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático. In: FILHO, O. K.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. VII, p. 1-54, 2011.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, mar. 2003.

REICHERT, J. M; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Tópicos em Ciência do Solo**. v. 5, 1. ed., Viçosa: SBCS, 2007.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, nov./dez., 2006.

REYNOLDS, W. D. et al. Indicators of good soil physical quality: Density and storage parameters. **Geoderma**, v.110, p.131-146, Nov. 2002.

RICHARD, G. et al. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 52, n. 1, p. 49-58, Mar., 2001.

ROCHA, M. G. da et al. Avaliação de modelo de extração da água do solo por sistemas radiculares divididos entre camadas de solo com propriedades hidráulicas distintas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1017-1028, jul./ago. 2010.

SANGOI, L. et al. **Ecofisiologia da cultura do milho para altos rendimentos**. Lages: Graphel, 2010, 87 p.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT procedure guide for personal computers**. 5.ed. Cary, 1999.

SILVA, A. P. et al. Indicadores da qualidade física do solo. In: VAN LIER, Q. de J. (Org.). **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, 2010, p. 241-281.

SILVA, A. P. da; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, Nov./Dec., 1994.

SILVA, E.B.; LIBARDI, P.L. Propriedades hidráulicas de um solo não saturado utilizando-se o permeâmetro a disco. **Scientia Agricola**, 57:525-529, 2000.

STRECK, C. A. **Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento radicular da cultura do feijoeiro e da soja**. 2003. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Biodinâmica de Solos) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. A água e as células vegetais; Fisiologia do estresse. In: **Fisiologia vegetal**. 3ª edição, Porto Alegre: Artmed Editora, 2006.

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, n. 4, p. 573-581, out./dez. 1998.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept., 1980.