



**MAÍSE SOARES DE MOURA**

**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS EM  
FUNÇÃO DO MANEJO NO ESTABELECIMENTO DE PLANTIO  
DIRETO**

**SETE LAGOAS - MG**

**2018**

**MAÍSE SOARES DE MOURA**

**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS EM  
FUNÇÃO DO MANEJO NO ESTABELECIMENTO DE PLANTIO  
DIRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós -  
Graduação em Ciências Agrárias (PPGCA), da  
Universidade Federal de São João del Rei, Campus  
Sete Lagoas-MG, como parte das exigências para a  
obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias  
na área de concentração em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Montoani Silva

Coorientador: Prof. Dr. Anderson Oliveira Latini

**SETE LAGOAS - MG**

**2018**

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M929i Moura, Maíse Soares de.  
Intervalo hídrico ótimo e produtividade de grãos em  
função do manejo no estabelecimento de plantio direto  
: Intervalo hídrico ótimo e umidade crítica para  
cultivo de grãos em estabelecimento de plantio  
direto sob manejos intensificados em região de  
limitação hídrica / Maíse Soares de Moura ; orientador  
Bruno Montoani Silva; coorientador Anderson  
Oliveira Latini. -- Sete Lagoas, 2018.  
42 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em  
Ciências Agrárias) -- Universidade Federal de São  
João del-Rei, 2018.

1. Qualidade física do solo. 2. Intensificação de  
cultivos. 3. Limitação hídrica. I. Silva, Bruno  
Montoani , orient. II. Latini, Anderson Oliveira ,  
co-orient. III. Título.

**MAÍSE SOARES DE MOURA**

**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS EM  
FUNÇÃO DO MANEJO NO ESTABELECIMENTO DE PLANTIO  
DIRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós -  
Graduação em Ciências Agrárias (PPGCA), da  
Universidade Federal de São João del Rei, Campus  
Sete Lagoas-MG, como parte das exigências para a  
obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias  
na área de concentração em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Montoani Silva

Coorientador: Prof. Dr. Anderson Oliveira Latini

Sete Lagoas, 19 de Fevereiro de 2018

Banca examinadora:

Dr. Emerson Borghi– EMBRAPA Milho e Sorgo

Dr. Diego Antônio França de Freitas - UFV

---

Dr. Bruno Montoani Silva - UFSJ/UFLA  
Orientador

**Dedico,  
aos meus pais, ao meu marido Alexandre e aos meus irmãos Jefferson e Filipe, a vocês  
eterna gratidão por todo carinho, companheirismo e compreensão nos momentos difíceis  
e pelo incentivo nos momentos felizes.**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, pela oportunidade de desfrutar das realizações as quais eu me propus.

Agradeço aos meus pais que desde sempre me apoiaram e acreditaram em minha capacidade de vencer. Sem vocês nada seria possível.

Ao meu marido Alexandre, pela paciência e por acreditar tanto em mim, mesmo quando eu insisto em não acreditar, por estar ao meu lado nos momentos difíceis e esperar ansiosamente pelos momentos felizes, por fazer parte de todos os momentos, e por me ajudar a entender que todas as etapas da vida devem ser vividas com as dificuldades e com as glórias lhes cabem.

À minha família. Aos meus irmãos sempre presentes, cada um a sua maneira contribuiu de forma impar nessa minha jornada. Jeffinho que eu tenha sempre sua esperança na vida, Filipe que eu tenha sempre o seu sorriso no rosto. A minha sogra, grande exemplo de luta e vitória. Agradeço as irmãs que a vida me deu, Karine e Fernanda vocês são mais do que cunhadas e me presentearam com algumas das pessoas mais importantes da minha vida: Ana Luísa, João Miguel e Lily.

Às melhores amigas que alguém pode ter (Dani, Marcela, Patty, Paula, Regyane e Thaís), vocês não sabem a força que me dão. Amo vocês profundamente.

A equipe do laboratório de física do solo vocês fizeram meus dias mais felizes, em especial Gabi, Marina e Eduardo. Paula, você me fez entender o que significa ter uma irmã de orientação, muito obrigada você foi essencial, do início ao fim.

À UFSJ, Campus Sete Lagoas, palco de alegrias, conquistas e muito aprendizado.

Ao meu orientador que acreditou em meu potencial acadêmico e me ajudou a trilhar os caminhos que me conduziram onde estou.

Ao meu Coorientador Anderson Latini, que há muito tempo me fez acreditar na ciência, se algum dia eu for um exemplo tão bom para os meus alunos como você, vou me considerar realizada profissionalmente.

À FAPEMIG pela concessão da bolsa de estudos.

Aos colegas, pelo companheirismo e por tornarem mais leves os momentos difíceis.

A todos aqueles que de alguma forma, contribuíram para esta realização.

Muito Obrigada!

## Sumário

RESUMO GERAL.....	I
GENERAL ABSTRACT .....	II
INTRODUÇÃO GERAL .....	1
REFERÊNCIAS .....	5
ARTIGO 1.....	11
INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E UMIDADE CRÍTICA PARA CULTIVO DE GRÃOS EM ESTABELECIMENTO DE PLANTIO DIRETO SOB MANEJOS INTENSIFICADOS EM REGIÃO DE LIMITAÇÃO HÍDRICA .....	11
Resumo - .....	11
Abstract - .....	12
1. Introdução .....	13
2. Material e Métodos .....	15
2.1. Local e implantação do experimento de campo .....	15
2.2. Sistemas de cultivo.....	17
2.3. Amostragem dos atributos físicos do solo para modelagem do IHO .....	19
2.4. Determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO).....	19
2.4.1. Incorporação da umidade crítica para as culturas no IHO .....	21
3. Resultados .....	23
3.1. Estatística descritiva e dos modelos de curva de retenção de água e curva de resistência a penetração .....	23
3.2. Restrições mecânicas e de aeração à disponibilidade de água no solo modeladas pelo IHO e IHO* .....	23
3.3. Efeitos dos sistemas de manejo sobre o IHO e IHO* nas safras 2014/2015 e 2015/2016 .....	26
3.4. Correlações entre atributos do solo e produtividade .....	29
4. Discussão.....	31
4.1. Modelagem do intervalo hídrico ótimo para as camadas de solo mais restritivas as raízes.....	31
4.2. Efeitos dos sistemas de manejo sobre o IHO e IHO* nas safras 2014/2015 e 2015/2016 .....	33
4.3. Atributos do solo e produtividade .....	36
5. Conclusão.....	37
6. Referências.....	39
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45

## INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS EM FUNÇÃO DO MANEJO NO ESTABELECIMENTO DE PLANTIO DIRETO

**RESUMO GERAL** - A crescente demanda por alimentos exige estratégias agrícolas eficientes e que sejam sustentáveis, sobretudo em regiões com limitação hídrica. Neste sentido, a intensificação de sistemas de cultivo em plantio direto (SPD), unindo rotação de culturas e cultivo intercalar com espécies com sistema radicular vigoroso, podem ser opção para melhorar a qualidade física do solo (QFS). O manejo conservacionista do solo promove alterações na estrutura e QFS, por consequência na retenção e disponibilização de água para as plantas. Dentre as ferramentas para avaliar a QFS, destaca-se o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), que associa ao conceito de capacidade de água disponível do solo para a planta, valores limitantes de resistência à penetração de raízes (RP) e porosidade de aeração, que são modelados em função da densidade do solo (Ds). Para aprimorar esse indicador, foi proposto a inserção da umidade crítica para a cultura como limite inferior do IHO (IHO\*), o que ainda não foi testado em sistemas de produção de grãos. O objetivo desse trabalho foi avaliar se a introdução de braquiária em cultivo intercalar com soja ou milho, em sistema de rotação, interfere na melhoria da QFS na fase de implantação do SPD, em região com limitação hídrica no centro do estado de Minas Gerais. A área experimental, de Latossolo Vermelho argiloso, em fase de implantação de SPD foi dividida em seis tratamentos: T1: soja monocultura, com médio investimento em fertilidade do solo; T2: milho monocultura, com médio investimento em fertilidade do solo; T3: rotação milho e soja, com médio investimento em fertilidade do solo; T4: rotação milho e soja + consórcio com *Urochloa ruziziensis*, com médio investimento em fertilidade do solo; T5: rotação milho e soja + consórcio com *U. ruziziensis*, com alto investimento em fertilidade do solo; T6: com rotação milho e soja, com alto investimento em fertilidade do solo. Foram avaliadas amostras de solo nas safras 2014/2015 e 2015/2016, nas profundidades 0-5 cm e 15-20 cm, sendo a modelagem do IHO realizada com dados da segunda safra. Os modelos gerados para as duas profundidades foram similares, consequência das operações de mobilização do solo para implantação do SPD. Quando utilizada a umidade crítica para a cultura no cálculo do IHO, o modelo indicou ocorrência de restrição hídrica antes da mecânica, bem como redução do IHO. Houve aumento da Ds na segunda safra avaliada, o que impactou no aumento da RP e consequente diminuição do IHO. Quando os valores de Ds médios (DsMed) foram avaliados, nenhum tratamento atingiu a Ds crítica do IHO (Dsc), no entanto, ao avaliar a Ds máxima (DsMax) nos tratamentos, o solo sob monocultivo ultrapassou a Dsc, indicando restrição severa ao crescimento de plantas. Por outro lado, foi observado redução da Ds Max e aumento do IHO no T5 (rotação milho e soja + consórcio com *U. ruziziensis*, com alto investimento em fertilidade do solo). Correlações entre produtividade de grãos e IHO ocorreram com IHO calculado com a DsMax, indicando que, ao reduzirem situações extremas de Ds, os sistemas de cultivo aumentaram a produtividade. Portanto, os resultados sugerem melhoria da QFS pela intensificação de cultivos após dois anos de implantação dos sistemas.

**Palavras-chave:** Qualidade física do solo, intensificação de cultivos, limitação hídrica, conteúdo de água crítico.



## LEAST LIMITING WATER RANGE AND GRAIN PRODUCTIVITY IN FUNCTION OF THE MANAGEMENT IN THE ESTABLISHMENT OF NO-TILLAGE SYSTEM

**GENERAL ABSTRACT** - The increasing demand for food requires efficient agricultural and sustainable strategies, especially in regions with water scarcity. In this regard, the intensification of no-tillage systems, linking crops rotation and intercropping with species which have a vigorous root system, may be used to improve soil physical quality (SPQ). The conservationist management of the soil promotes changes in its structure and SPQ and consequently changes in the retention and availability of water for the plants. Among the tools to evaluate the SPQ, in the present study, its highlighted the Least limiting water range (LLWR), a robust SPQ indicator, which associates to the concept of available water capacity for the plant, limiting values of resistance to the penetration of roots (RP) and Air-filled porosity, which are modeled in function of the soil density (Ds). To improve the indicator, it was proposed the insertion of the critical soil moisture for the crop as the inferior limit of the LLWR (LLWR\*), which hasn't been tested in grain production systems. The objective of this research is to evaluate if the introduction of brachiaria intercropped with soybean or maize, in a rotational system, interferes with the improvement of SPQ in the implantation phase of no-tillage cropping system, in regions with water limitation in the central part of the state Minas Gerais. The experimental area of red clay latosol, during the implantation phase of a no-tillage system was divided into six treatments: T1: monoculture of soybean, with medium investment in soil fertility; T2: monoculture of maize, with medium investment in soil fertility; T3: rotation of maize and soybean, with average investment in soil fertility; T4: rotation of maize and soybean intercropped with *Urochloa ruziziensis*, with average investment in soil fertility; T5: rotation of maize and soybean intercropped with *U. ruziziensis*, with high investment in soil fertility; T6: with maize and soybean in rotation, with high investment in soil fertility. Soil samples were collected and evaluated after the harvests of 2014/2015 and 2015/2016, at depths of 0-5 cm and 15-20 cm. Nevertheless, the LLWR model was performed with research data from the second harvest. The models generated for both depths were similar, which is a consequence of the operations used for the mobilization of the soil to implement the no-tillage system. When the critical soil moisture is used for the crop to calculate LLWR, the model has indicated the occurrence of water restriction before the mechanic one, as well as the reduction of the LLWR. There was an increase of the Ds in the second crop evaluated, which caused an increase of the PR and consequently the decrease of the LLWR. When the medium values of the density (DsMed) were evaluated, no treatment reached the *critical bulk density* value (D<sub>bc</sub>) of the LLWR, however, when the maximum density (DsMax) was evaluated during the treatments, the soil under monoculture exceeded the *critical bulk density* value (D<sub>bc</sub>), indicating severe restriction in plant growth. On the other hand, it was observed a reduction of the Ds Max and increase of the LLWR in T5 (rotation of maize and soybean intercropped with *U. ruziziensis*, with high investment in soil fertility). Correlations between grain productivity and LLWR occurred with LLWR being calculated with the DsMax, indicating that, by reducing extreme situations of Ds, cropping systems increased in productivity. Therefore, the results suggest that the SPQ was improved through crop intensification two years after the implantation of the systems.

**Keywords:** Soil physical quality, crop intensification, historical limitation, critical water content.

## INTRODUÇÃO GERAL

O crescente aumento da população tem gerado demandas até então sem precedentes sobre a agricultura e assim sobre os recursos naturais (Foley et al., 2011). Essa demanda pode ser suprida de duas maneiras, pela expansão de terras cultivadas ou pela intensificação dos sistemas de cultivo, para aumentar o rendimento das culturas (Pradhan et al., 2015). Como exemplo do segundo caso é possível citar, a adoção de cultivos intercalares de plantas forrageiras em sistemas de produção de grãos (Crusciol et al., 2014), como alternativa viável economicamente, sustentável, que pode resultar também em alterações favoráveis aos atributos do solo e sem prejuízos a cultura principal. Outra opção é a adoção de rotação de culturas, que podem modificar as propriedades físicas do solo, diminuindo os efeitos negativos da compactação no crescimento de plantas (Chen et al., 2014).

Práticas de manejo que presem pela utilização sustentável do solo são necessárias para a produção agrícola, uma vez que refletem nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Arévalo-Gardini et al., 2015; Campos-Herrera et al., 2008; Cecagno et al., 2016; Olibone et al., 2010). Para o sucesso dessas práticas, é fundamental o entendimento dos processos que afetam a qualidade física do solo (QFS) (Olibone et al., 2010) e determinar quais as práticas mais adequadas à manutenção dos sistemas de produção. É importante também definir quais os manejos são mais eficientes para cada região, uma vez que a posição espacial de cada lavoura pode interferir em qual estratégia é mais adequada (Cecagno et al., 2016).

A adoção de sistemas complexos, que combinem culturas diferentes, intensificando o uso da terra, sob condições adequadas, contribui para restaurar solos degradados, aumentar a produtividade e promover melhorias no ambiente (Chen et al., 2014; Safadoust et al., 2014). A tendência é que cultivos que combinem culturas no tempo e no espaço gerem ambientes mais complexos e que sustentam uma gama maior de processos, tornando as lavouras mais dinâmicas e sustentáveis.

Estudos que visam entender esses arranjos dentro dos sistemas de cultivos, se tornam cada vez mais frequentes, devido aos problemas encontrados em sistema de plantio direto (SPD) (Arévalo-Gardini et al., 2015; Pittelkow et al., 2015). Sob o SPD, a compactação é o principal processo de degradação da estrutura do solo e, portanto de redução da QFS (Pittelkow et al., 2015). As consequências da compactação vão desde a aceleração da erosão do solo, perda de matéria orgânica, diminuição da porosidade

responsável pelo crescimento de raízes, fornecimento de água, trocas gasosas e nutrientes. E assim, ocasionando a redução da produtividade e aumento dos custos de produção (Trevisan et al., 2017), sendo importante destacar que manejo adequado do solo pode reverter ou minimizar efeitos negativos da compactação.

Com relação a produtividade das culturas, em situações distintas, diversos autores relacionam positivamente a QFS e a produtividade de culturas anuais (Beutler et al., 2006; Liane et al., 2010; Stone et al., 2013). Guimarães Júnnyor et al. (2015), avaliaram a qualidade física do solo e o rendimento da cultura do sorgo, em tratamentos submetidos a níveis de compactação por tráfegos de máquinas e foi observada a interferência da QFS na produtividade final e também na qualidade do produto. Dessa forma, Letey (1985) estabeleceu a relação direta entre a física do solo, por meio dos fatores água, ar, temperatura e resistência mecânica, e a produtividade dos cultivos. No entanto, o mesmo autor aponta que essa relação é fortemente influenciada pelas condições climáticas, com umidade do solo em destaque, por refletir tais condições e controlar os demais fatores. Nesse sentido, Cecagno et al. (2016) destacam que no cultivo da soja, em condições adequadas de precipitação, a produtividade dependeu principalmente da quantidade e distribuição de chuvas e sofreu pouca influência da QFS. No entanto, em locais onde a precipitação anual não é bem distribuída e com o período chuvoso caracterizado pela ocorrência de veranicos, como no caso do Cerrado mineiro, é provável que os mecanismos destacados por Letey (1985) tendam a preservar e disponibilizar água na região radicular.

Para avaliar a QFS, foi elaborado o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), um indicador quantitativo introduzido por Silva et al. (1994). A menor magnitude do IHO significa expor as culturas a uma menor faixa de umidade no solo com condições físicas adequadas de resistência mecânica e disponibilidade de ar e água. Portanto, sob ausência de precipitação pluviométrica adequada, sistemas de manejo com menor IHO estão sujeitos a condicionar mais limitações físicas as plantas. Silva e Kay (1996) apresentaram correlações significativas do IHO com o crescimento das plantas e sugeriram uma possível relação com a produtividade. Todavia, existem questionamentos a respeito do uso do IHO como indicador agrônomo para orientar manejo do solo para maior produtividade das culturas (Cecagno et al., 2016; Gubiani et al., 2013). Esses autores não observaram correlação entre o IHO e a produtividade de soja e milho (Cecagno et al., 2016), sob condições adequadas de precipitação mesmo sendo sensível aos efeitos da compactação e sua correção (Gubiani et al., 2013).

A fim de tornar esse indicador mais preciso, um avanço relacionado à determinação do IHO foi realizado por Silva et al. (2015), os quais substituíram o ponto de murcha permanente pela umidade crítica como limite inferior do IHO. Os autores modelaram uma equação baseada nas definições de água prontamente disponível e fator de depleção da evapotranspiração. Quando a umidade crítica foi incorporada ao modelo de IHO (IHO\*), observou-se uma redução na capacidade de suprimento de água do solo às plantas, pois o IHO\* estima a condição física que leva à maior produtividade e não apenas a sobrevivência da planta. Nesse sentido, espera-se maior correlação com a produtividade, o que ainda não foi testado até o momento.

Com relação a aplicação do IHO na distinção de manejos, uma abordagem mais específica diz respeito ao uso do IHO para avaliação temporal da QFS. Nesse contexto, Tormena et al. (2007) realizaram um estudo visando a discriminação dos efeitos de diferentes sistemas de manejo em SPD na qualidade física do solo, efetuando amostragens em épocas distintas: outubro de 2002, após a cultura de inverno (trigo) e abril de 2003, após a cultura de verão (soja). Os autores observaram que a variação temporal do IHO nos diferentes sistemas dependeu da variação da densidade do solo, sendo o IHO reduzido com o aumento da densidade. Além disso, no SPD com rotação, a maior retenção de água em elevados potenciais possibilitou, temporalmente, valores superiores do IHO.

Na mesma linha, Lima et al. (2012) concluíram que ocorreu uma melhoria da estrutura do solo de forma gradativa, sendo que esta evolução estrutural foi constatada pelo aumento do IHO em um Latossolo Vermelho-Amarelo durante o período chuvoso de 2008 a 2009. Durante três anos, Olibone et al. (2010) investigaram os efeitos da rotação de culturas e da escarificação sobre o IHO e a produção das culturas. Nesse estudo, o IHO representou satisfatoriamente as condições físico-hídricas do solo, as quais foram incrementadas pela escarificação em até dois anos e pela rotação de culturas a partir do segundo ano. Finalmente, considerando o potencial de descompactação do solo atribuído a algumas forrageiras, Neto et al. (2015) também utilizaram com êxito o IHO, encontrando valores coerentes com os resultados da descompactação biológica promovida por capins do gênero *Brachiaria* em integração agricultura-pecuária.

A possibilidade de utilizar manejos para melhorar a QFS nos sistemas produtivos é constantemente destacada na literatura (Cecagno et al., 2016; Neto et al., 2015; Lima et al., 2012; Olibone et al., 2010). Nesse sentido, estratégias de manejos

podem minimizar efeitos negativos em regiões caracterizadas por longos períodos de seca ou ocorrência de veranicos na estação chuvosa. Essa condição climática é predominante na região de Sete Lagoas e não possibilita cultivos em safrinha. Dessa forma, estratégias que associam cultivos intercalares a cultura principal, incrementam a produção de palhada, favorecendo os cultivos seguintes, em especial com relação a otimização do uso de água e possivelmente minimizam as perdas de produtividade em função dos veranicos. Nesse sentido, diversos benefícios são apontados com a utilização de plantas de cobertura com sistema radicular volumoso e agressivo, em especial com capacidade de crescer em solos com alta resistência mecânica, promovendo melhor arranjo poroso ao solo e favorecendo as culturas subsequentes (Calonego et al., 2011). Assim, o SPD com intensificação de cultivos, em especial quando utilizadas as culturas com sistema radicular vigoroso, proporciona maior produção de palhada, e favorece o aprofundamento radicular e quando associado a um maior aporte nutricional, pode se destacar como uma importante estratégia para mitigar impactos causados pela escassez hídrica típica da região do cerrado.

## REFERÊNCIAS

- Arévalo-Gardini, E., Canto, M., Alegre, J., Loli, O., Julca, A., Baligar, V., 2015. Changes in soil physical and chemical properties in long term improved natural and traditional agroforestry management systems of cacao genotypes in Peruvian Amazon. *PLoS One* 10, 1–29. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132147>
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A., Dexter, A.R., 2010. Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Plant Soil* 335, 229–244. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.06.009>
- Balbinot, A.A., Dos Santos, J.C.F., Debiasi, H., Yokoyama, A.H., 2017. Contribution of roots and shoots of *Brachiaria* species to soybean performance in succession. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 52, 592–598. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000800004>
- Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., Valentine, T. a, 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exp. Bot.* 62, 59–68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>
- Bengough, A.G., Mullins, C.E., 1990. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.* 41, 341–358. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1990.tb00070.x>
- Benjamin, J.G., Nielsen, D.C., Vigil, M.F., 2003. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma* 116, 137–148. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00098-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00098-3)
- Bergamaschi, H., Dalmago, G.A., Comiran, F., Bergonci, J.I., Müller, A. G. França, S., Santos, A.O., Radin, B ., Pereira, P.G., 2006. Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho. *Pesq.agropec.bras.Brasilia* 41, 243–249.
- Beutler, A.N., Centurion, J.F., 2003. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 38, 849–856. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000700009>
- Beutler, A.N., Centurion, J.F., Da Cruz Centurion, M.A.P., Leonel, C.L., De Cássia Gomes São João, A., Da Silva Freddi, O., Centurion, M.A.P. da C., Leonel, C.L., João, A. de C.G.S., Fredd, O. da S., I, 2007. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um latossolo vermelho cultivado com soja. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 31, 1223–1232. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600001>
- Beutler, A.N., Centurion, J.F., Silva, A.P., Barbosa, J.C., 2006. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja Optimal water interval and yield of soybean cultivars. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 10, 639–645.
- Borghi, E., Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Sousa, V. V., Martins, P.O., Mateus, G.P., Costa, C., 2013. Sorghum grain yield, forage biomass production and revenue as affected by intercropping time. *Eur. J. Agron.* 51, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.08.006>
- Büchi, L., Wendling, M., Amossé, C., Jeangros, B., Sinaj, S., Charles, R., 2017. Long and short term changes in crop yield and soil properties induced by the reduction of soil tillage in a long term experiment in Switzerland. *Soil Tillage Res.* 174, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.002>
- Busscher, W.J., 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content, *Transactions of the American Society of Agricultural*

- Engineers. <https://doi.org/10.13031/2013.31360>
- Calonego, J. C., Borghi, E., Crusciol, C.A.C., 2011. Intervalo Hídrico Ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. *R. Bras. Ci. Solo* 35, 2183–2190.
- Calonego, J.C., Raphael, J.P.A., Rigon, J.P.G., Oliveira Neto, L. de, Rosolem, C.A., 2017. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *Eur. J. Agron.* 85, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.02.001>
- Campos-Herrera, R., Gómez-Ros, J.M., Escuer, M., Cuadra, L., Barrios, L., Gutiérrez, C., 2008. Diversity, occurrence, and life characteristics of natural entomopathogenic nematode populations from La Rioja (Northern Spain) under different agricultural management and their relationships with soil factors. *Soil Biol. Biochem.* 40, 1474–1484. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.01.002>
- Cecagno, D., de Andrade Costa, S.E.V.G., Anghinoni, I., Kunrath, T.R., Martins, A.P., Reichert, J.M., Gubiani, P.I., Balerini, F., Fink, J.R., de Faccio Carvalho, P.C., 2016. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Soil Tillage Res.* 156, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.005>
- Chen, G., Weil, R.R., Hill, R.L., 2014. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil Tillage Res.* 136, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.004>
- Crusciol, C.A.C., Mateus, G.P., Nascente, A.S., Martins, P.O., Borghi, E., Pariz, C.M., 2012. An innovative crop-forage intercrop system: Early cycle soybean cultivars and palisadegrass. *Agron. J.* 104, 1085–1095. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0002>
- Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Borghi, E., Soratto, R.P., Martins, P.O., 2015. Improving Soil Fertility and Crop Yield in a Tropical Region with Palisadegrass Cover Crops. *Agron. J.* 107, 2271. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0603>
- Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Mateus, G.P., Pariz, C.M., Martins, P.O., Borghi, E., 2014. Intercropping soybean and palisade grass for enhanced land use efficiency and revenue in a no till system. *Eur. J. Agron.* 58, 53–62. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2014.05.001>
- Denmead, O.T., Shaw, R.H., 1962. Availability of Soil Water to Plants as Affected by Soil Moisture Content and Meteorological Conditions1. *Agron. J.* 54, 385. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050005x>
- Derpsch, R., Franzluebbbers, A.J., Duiker, S.W., Reicosky, D.C., Koeller, K., Friedrich, T., Sturny, W.G., Sá, J.C.M., Weiss, K., 2014. Why do we need to standardize no-tillage research? *Soil Tillage Res.* 137, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.10.002>
- Eitzinger, J., Trnka, M., Hösch, J., Žalud, Z., Dubrovský, M., 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecol. Modell.* 171, 223–246. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.08.012>
- Ferreira, C.J.B., Zotarelli, L., Tormena, C.A., Rens, L.R., Rowland, D.L., 2017. Effects of water table management on least limiting water range and potato root growth. *Agric. Water Manag.* 186, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.02.020>
- Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., O’Connell, C., Ray, D.K., West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., Zaks, D.P.M., 2011. Solutions for a cultivated planet.

- Nature 478, 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Gathala, M.K., Ladha, J.K., Saharawat, Y.S., Kumar, V., Kumar, V., Sharma, P.K., 2011. Effect of Tillage and Crop Establishment Methods on Physical Properties of a Medium-Textured Soil under a Seven-Year Rice–Wheat Rotation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75, 1851. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0362>
- Genro Junior, S.A., Reinert, D.J., Reichert, J.M., 2004. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 28, 477–484. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300009>
- Grable, A.R., Siemer, E.G., 1968. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 32, 180–186.
- Gubiani, P.I., Goulart, R.Z., Reichert, J.M., José, D., 2013a. CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE MILHO ASSOCIADOS. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 37, 1502–1511.
- Gubiani, P.I., Goulart, R.Z., Reichert, J.M., Reinert, D.J., 2013b. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 37, 1502–1511.
- Guimarães Júnnyor, S., Severiano, C., Silva, G., Gonçalves, W.G., Andrade, R., Roberto, B., 2015. Comissão 3.3 - Manejo e conservação do solo e da água Sweet Sorghum Performance Affected by Soil Compaction and Sowing Time as a Second Crop in the Brazilian Cerrado. *Rev. Bras. Cienc. Do Solo* 39, 1744–1754. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20150121>
- Håkansson, I., Stenberg, M., Rydberg, T., 1998. Long-term experiments with different depths of mouldboard ploughing in Sweden. *Soil Tillage Res.* 46, 209–223. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00099-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00099-3)
- Hamza, M.A., Anderson, W.K., 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 82, 121–145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Huang, M., Liang, T., Wang, L., Zhou, C., 2015. Effects of no-tillage systems on soil physical properties and carbon sequestration under long-term wheat-maize double cropping system. *Catena* 128, 195–202. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.010>
- Jong van Lier, Q., 1997. The critical soil water content and its relation to soil water dynamics. *Sci. Agric.* 54, 45–50. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161997000300009>
- Klein, V.A., Camara, R.K., 2007. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 31, 221–227. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000200004>
- Kuncoro, P.H., Koga, K., Satta, N., Muto, Y., 2014. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices. *Soil Tillage Res.* 143, 180–187. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.008>
- Leao, T.P., da Silva, a P., 2004. A simplified Excel((R)) algorithm for estimating the least limiting water range of soils. *Sci. Agric.* 61, 649–654. <https://doi.org/Doi.10.1590/S0103-90162004000600013>
- Letey, J., 1985. Relationship between soil physical properties and crop productions. *Adv. Soil Sci. Soil Sci.* 1, 277–294. <https://doi.org/10.1097/00010694-199005000-00010>
- Liane, C., Lima, R. De, Reinert, D.J., Reichert, J.M., 2010. Produtividade de culturas e resistência à penetração de Argissolo Vermelho sob diferentes manejos 89–98.



- <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000100012>
- Lima, V. M. P. Oliveira, G. C. de Serafim, M. E. Curi, N. Evangelista, A.R., 2012. Intervalo Hídrico Ótimo como Indicador de melhoria da Qualidade Estrutural de. *Rev. Bras. Ciência* 36, 71–78.
- Mentges, M.I., Reichert, J.M., Rodrigues, M.F., Awe, G.O., Mentges, L.R., 2016. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. *Geoderma* 263, 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.042>
- Mishra, A.K., Aggarwal, P., Bhattacharyya, R., Das, T.K., Sharma, A.R., Singh, R., 2015. Least limiting water range for two conservation agriculture cropping systems in India. *Soil Tillage Res.* 150, 43–56.
- Mohammadi, M.H., Asadzadeh, F., Vancloster, M., 2010. Refining and unifying the upper limits of the least limiting water range using soil and plant properties. *Plant Soil* 334, 221–234. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0377-3>
- Moraes, M.T. de, Silva, V.R. Da, Zwirtes, A.L., Carlesso, R., 2014. Use of penetrometers in agriculture: a review. *Eng. Agrícola* 34, 179–193.
- Müller, M.M.L., Ceccon, G., Rosolem, C.A., 2001. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 25, 531–538. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000300002>
- Neto, J.F., Severiano, E. da C., de Pinho Costa, K.A., Guimaraes Junnyor, W.S., Goncalves, W.G., Andrade, R., 2015. Biological soil loosening by grasses from genus *Brachiaria* in crop-livestock integration. *Acta Sci.* 37, 375–383. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v37i3.19392>
- Nunes, M.R., Denardin, J.E., Pauletto, E.A., Faganello, A., Pinto, L.F.S., 2015. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. *Soil Tillage Res.* 148, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.007>
- Olibone, D., E, A.P., R, C.A., 2010. Least limiting water range and crop yields as affected by crop rotations and tillage. *Soil Use Manag.* 26, 485–493. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00301.x>
- Papadopoulos, A., Bird, N.R.A., Whitmore, A.P., Mooney, S.J., 2014. Does organic management lead to enhanced soil physical quality? *Geoderma* 213, 435–443. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.033>
- Pariz, C.M., Costa, C., Crusciol, C.A.C., Meirelles, P.R.L., Castilhos, A.M., Andreotti, M., Costa, N.R., Martello, J.M., Souza, D.M., Protes, V.M., Longhini, V.Z., Franzluebbbers, A.J., 2017. Production, nutrient cycling and soil compaction to grazing of grass companion cropping with corn and soybean. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 108, 35–54. <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9821-y>
- Pariz, C.M., Costa, C., Crusciol, C.A.C., Meirelles, P.R.L., Castilhos, A.M., Andreotti, M., Costa, N.R., Martello, J.M., Souza, D.M., Sarto, J.R.W., Franzluebbbers, A.J., 2016. Production and soil responses to intercropping of forage grasses with corn and soybean silage. *Agron. J.* 108, 2541–2553. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.02.0082>
- Pittelkow, C.M., Linquist, B.A., Lundy, M.E., Liang, X., van Groenigen, K.J., Lee, J., van Gestel, N., Six, J., Venterea, R.T., van Kessel, C., 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *F. Crop. Res.* 183, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.020>
- Pradhan, P., Fischer, G., Van Velthuizen, H., Reusser, D.E., Kropp, J.P., 2015. Closing yield gaps: How sustainable can we be? *PLoS One* 10, 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129487>

- Resende, Á., Silva, A., Borghi, E., Marques Gontijo Neto, M., Pitta, R., Ferreira, A., 2016. Tomada de Decisão Quanto a Adubação e Manejo de Nutrientes por Agricultores do Mato Grosso: Dados do Circuito Tecnológico 2015. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25169.53609>
- Safadoust, A., Feizee, P., Mahboubi, A.A., Gharabaghi, B., Mosaddeghi, M.R., Ahrens, B., 2014. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. *Agric. Water Manag.* 136, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.007>
- Savage, M.J., Ritchie, J.T., Bland, W.L., Dugas, W.A., 1996. Lower Limit of Soil Water Availability. *Agron. J.* 88, 644–651. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800040024x>
- Serafim, M.E., de Oliveira, G.C., Vitorino, A.C.T., Silva, B.M., Carducci, C.E., 2013. Qualidade Física E Intervalo Hídrico Ótimo Em Latossolo E Cambissolo, Cultivados Com Cafeeiro, Sob Manejo Conservacionista Do Solo. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 37, 733–742. <https://doi.org/10.1590/S0100-068320130003000020>
- Severiano, E. da C., Oliveira, G.C. De, Dias Junior, M.D.S., Costa, K.A. de P., Silva, F.G., Ferreira Filho, S.M., 2011. Structural changes in Latosols of the Cerrado region: I – Relationships between soil physical properties and least limiting. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 35, 773–782.
- Silva, A.P., Kay, B.D., 1996. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant Soil* 184, 323–329. <https://doi.org/10.1007/BF00010461>
- Silva, A.P., Kay, B.D., Perfect, E., 1994. Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1775–1781. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x>
- Silva, B.M., da Silva, E.A., de Oliveira, G.C., Ferreira, M.M., Serafim, M.E., 2014. Plant-Available Soil Water Capacity: Estimation Methods and Implications. *Rev. Bras. Cienc. Do Solo* 38, 464–475. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200011>
- Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., Silva, É.A., Ferreira, M.M., Norton, L.D., Curi, N., 2015. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. *Soil Tillage Res.* 154, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.013>
- Soane, B.D., Ball, B.C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., Roger-Estrade, J., 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil Tillage Res.* 118, 66–87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>
- STAFF., S.S., 1999. Soil taxonomy, Agriculture Handbook No. 436.
- Stone, L.F., Ferreira, E.P.D.B., Didonet, A.D., Heinemann, A.B., Oliveira, J.P. De, 2013. Correlação entre a produtividade do feijoeiro no sistema de produção orgânica e atributos do solo. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 17, 19–25. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000100003>
- Stone, L.F., Silveira, P.M., 2001. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 25, 395–401. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000100012>
- Tavares Filho, J., Barbosa, G.M.C., Guimarães, M.F., Fonseca, I.C.B., 2001. RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA RADICULAR DO MILHO (*Zea mays*) SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO EM UM LATOSSOLO ROXO. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 25, 725–730.

- Tormena, C.A., Araújo, M.A., Fidalski, J., Costa, J.M. Da, 2007. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 31, 211–219. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000200003>
- Tormena, C.A., Barbosa, M.C., Carlos, A., Gonçalves, C.A., 2002. DENSIDADE, POROSIDADE E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO EM LATOSSOLO CULTIVADO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO. *Scientia* 795–801.
- Tormena, C.A., Karlen, D.L., Logsdon, S., Cherubin, M.R., 2017. Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. *Soil Tillage Res.* 166, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.015>
- Tormena, C.A., Silva, A.P. Da, Libardi, P.L., 1999. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Tillage Res.* 52, 223–232. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00086-0)
- Trevisan, R.G., Freddi, O. da S., Wruck, F.J., Tavanti, R.R., Peres, F.S.C., 2017. Variabilidade de atributos físicos do solo e do arroz cultivado sob plantas de cobertura em sistema de integração lavoura-pecuária. *Bragantia* 76, 145–154. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.596>
- Verma, S., Sharma, P.K., 2008. Long-term effects of organics, fertilizers and cropping systems on soil physical productivity evaluated using a single value index (NLWR). *Soil Tillage Res.* 98, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.08.005>
- Williams, S.M., Weil, R.R., 2004. Crop Cover Root Channels May Alleviate Soil Compaction Effects on Soybean Crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 1403. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1403>

## ARTIGO 1

### INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E UMIDADE CRÍTICA PARA CULTIVO DE GRÃOS EM ESTABELECIMENTO DE PLANTIO DIRETO SOB MANEJOS INTENSIFICADOS EM REGIÃO DE LIMITAÇÃO HÍDRICA

**Resumo** - A intensificação de sistemas de cultivo de grãos, aliando rotação de culturas ao uso de espécies de sistema radicular vigoroso em cultivo intercalar e alto investimento em fertilização pode ser estratégia para agregar eficiência e sustentabilidade no estabelecimento do plantio direto (SPD) em regiões com limitação hídrica. Neste estudo o objetivo foi avaliar essas práticas na melhoria da capacidade do solo em potencialmente fornecer água, ar, e resistência mecânica adequada, para favorecer a produtividade de grãos (soja e milho), estimados pelo indicador de qualidade física do solo Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). Para aumentar a eficiência da modelagem do IHO, testou-se a substituição do ponto de murcha permanente pela umidade crítica da cultura (IHO\*). A área experimental, de Latossolo Vermelho argiloso, em fase de implantação de SPD foi dividida em seis tratamentos: T1: soja monocultura, com médio investimento em fertilidade do solo; T2: milho monocultura, com médio investimento em fertilidade do solo; T3: rotação milho e soja, com médio investimento em fertilidade do solo; T4: rotação milho e soja + consórcio com *Urochloa ruziziensis*, com médio investimento em fertilidade do solo; T5: rotação milho e soja + consórcio com *U. ruziziensis*, com alto investimento em fertilidade do solo; T6: rotação milho e soja, com alto investimento em fertilidade do solo. Foram coletadas amostras de solo nas duas primeiras safras, 2014/2015 e 2015/2016, nas profundidades 0-5 cm e 15-20 cm, sendo a modelagem do IHO realizada com dados da segunda safra. Os modelos obtidos para as duas profundidades foram similares, consequência das operações de mobilização do solo para implantação do SPD. O uso de da umidade crítica implicou na ocorrência de restrição hídrica antes da mecânica, bem como redução do IHO. A Ds média aumentou na segunda safra avaliada, o que impactou no aumento da RP e consequente diminuição do IHO, mas sem atingir a Ds crítica (IHO=0). Contudo, a Ds máxima (DsMax) nos tratamentos sob monocultivo ultrapassou a Dsc, indicando restrição severa ao crescimento de plantas. Por outro lado, foi observado redução da Ds Max e aumento do IHO em T5. Correlações significativas entre produtividade de grãos e IHO ocorreram com IHO calculado com a DsMax, indicando que, ao reduzirem situações extremas, os sistemas de cultivo aumentaram a produtividade. Portanto, os resultados sugerem melhoria da QFS pela intensificação de cultivos após dois anos de implantação do plantio direto.

**Palavras-chave:** Qualidade física do solo, intensificação de cultivos, densidade do solo, disponibilidade de água para a planta.

## LEAST LIMITING WATER RANGE AND CRITICAL SOIL MOISTURE FOR GRAIN CROPS IN THE ESTABLISHMENT OF NO-TILLAGE SYSTEM UNDER INTENSIFIED MANAGEMENT IN A REGION WITH WATER LIMITATION

**Abstract** - The intensification of grain cropping systems, combining crop rotation and the use of species with vigorous root system under intercropped system with high fertilization investment, may be a strategy to aggregate efficiency and sustainability in the establishment of no-tillage management in regions with limited water resources. The objective of this study, is to evaluate these practices in the improvement of the capacity of the soil in potentially providing adequate water, air, and mechanical resistance for grain productivity (soybean and corn) estimated by the soil physical quality indicator, called Least Limiting Water Range (LLWR). In order to increase the modeling's efficiency of the LLWR, it was tested to replace the permanent wilting point by the critical soil moisture. The experimental area of red clay latosol, during the implantation phase of a no-tillage system was divided into six treatments: T1: monoculture of soybean, with medium investment in soil fertility; T2: monoculture of maize, with medium investment in soil fertility; T3: rotation of maize and soybean, with average investment in soil fertility; T4: rotation of maize and soybean intercropped with *Urochloa ruziziensis*, with average investment in soil fertility; T5: rotation of maize and soybean intercropped with *U. ruziziensis*, with high investment in soil fertility; T6: with maize and soybean in rotation, with high investment in soil fertility. Soil samples were collected and evaluated after the harvests of 2014/2015 and 2015/2016, at depths of 0-5 cm and 15-20 cm, however the modeling of the LLWR was performed with research data from the second harvest. The models generated for both depths were similar, which is a consequence of the operations used for the mobilization of the soil to implement the no-tillage system. The use of the critical soil moisture implied the occurrence of water restriction before the mechanic one, as well as the reduction of the LLWR. There was an increase of the  $D_s$  in the second crop evaluated, which caused an increase of the PR and consequently the decrease of the LLWR, but without reaching the critical bulk density  $D_{bc}$  (LLWR= 0). Nevertheless, the maximum density ( $D_{sMax}$ ) in the treatments under monoculture system, exceeded the *critical bulk density* value ( $D_{bc}$ ), indicating severe restriction in plant growth. On the other hand, it was observed an reduction of the  $D_s$  Max and an increase of the LLWR in T5. Significant correlations between grain productivity and LLWR occurred with LLWR being calculated with  $D_{sMax}$ , indicating that, by reducing extreme situations, cropping systems increased in productivity. Therefore, the results suggest that the SPQ was improved by crop intensification two years after the implantation of no-tillage system.

**Keywords:** Soil physical quality, crop intensification, bulk density, no-tillage.

## 1. Introdução

Os solos sob sistema de plantio direto (SPD) são propícios a se tornarem mais porosos com o tempo, em função de uma estrutura mais estável, do aumento de carbono orgânico e da maior presença de bioporos (Huang et al., 2015; Papadopoulos et al., 2014; Williams and Weil, 2004). No entanto, na fase de implantação do SPD, diversas limitações aos sistemas produtivos são apontadas na literatura (Büchi et al., 2017; Derpsch et al., 2014; Pittelkow et al., 2015; Soane et al., 2012). Dentre as limitações, a compactação se destaca como uma das principais causas da degradação da estrutura ou redução da qualidade física do solo (QFS). Nesse sentido, a produção das culturas pode ser fortemente limitada pela QFS (Tormena et al., 2017), quando há restrições de aeração, alta resistência mecânica ao crescimento de raízes e baixa disponibilidade de água (Letey, 1985).

Uma forma integrada de avaliar a QFS para o crescimento de plantas foi proposta por Letey (1985), introduzindo o conceito de “Non Limiting Water Range”. A partir desse conceito, Silva et al. (1994) apresentou uma forma de quantificar, modelar e assim permitir a predição das condições físicas do solo menos limitantes às plantas, em função das alterações causadas pelo manejo do solo. Baseado no efeito integrado da porosidade de aeração (PA), resistência à penetração de raízes (RP) e o conceito de capacidade de água disponível (CAD), foi elaborado o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), um indicador de QFS que se correlaciona com o crescimento das culturas (Silva e Kay, 1996). Em outras palavras, esse indicador incorpora ao conceito de CAD, valores limitantes de RP e PA, delimitando uma faixa de umidade no solo que as limitações físicas às plantas são mínimas, em função da densidade do solo.

Apesar de toda a fundamentação que justifique a acurácia do IHO, alguns estudos mostraram que ele não se correlacionou com o crescimento e produtividade de plantas (Benjamin et al., 2003; Cecagno et al., 2016; Gubiani et al., 2013; Olibone et al., 2010). Por essa razão, têm sido propostos ajustes que visem torná-lo mais preciso (Asgarzadeh et al., 2010; Mohammadi et al., 2010; Silva et al., 2015) e passível de ser usado como um índice agronômico. Uma limitação inerente ao conceito de CAD, que tem como limite inferior o Ponto de Murcha Permanente (PMP), é que antes que o solo atinja esse limite a planta já reduz acentuadamente a absorção de água (Silva et al., 2015). Silva et al. (2015) propuseram a substituição do ponto de murcha permanente (PMP) pelo conteúdo de água crítico ( $\Theta^*$ ), como limite inferior do IHO (IHO\*). O  $\Theta^*$  é

o teor de água no solo em que ocorre redução na abertura de estômatos, devido ao estresse hídrico (Eitzinger et al., 2004; Silva et al., 2015; Van Lier, 1997), implicando em redução de crescimento e impactando na produtividade das culturas. Quando o  $\Theta^*$  foi incorporado ao modelo de IHO, observou-se redução na estimativa da capacidade de suprimento de água do solo às plantas e limitação hídrica superior a mecânica (Silva et al., 2015). Contudo ainda não há registros na literatura da relação entre IHO\* e crescimento e produtividade de culturas. Espera-se que a maior amplitude do IHO\* reflita em maiores valores produtividade.

Práticas de manejo que ampliam a faixa de umidade no solo delimitada pelo IHO podem melhorar o potencial de produtividade das culturas (Benjamin et al., 2003; Silva e Kay, 1996). Práticas adotadas no SPD, como ausência de revolvimento do solo, rotação de culturas e manutenção da palhada têm mostrado efeito positivo no IHO (Chen et al., 2014; Crusciol et al., 2014; Müller et al., 2001; Tormena et al., 1999; Williams and Weil, 2004). O SPD alcança maior produtividade vegetal quando é feita rotação de culturas associada à presença de palhada no solo, sendo essas práticas importantes para intensificação sustentável da produtividade em regiões com clima mais seco (Pittelkow et al., 2015).

Com relação ao SPD em regiões com estação seca prolongada no inverno e ocorrência de veranicos, como o Cerrado brasileiro, há baixo acúmulo de biomassa vegetal da safra de verão associado à impossibilidade de cultivos de grãos em safra de outono-inverno devido à baixa disponibilidade de água, tornando a boa formação de palhada um desafio (Borghetti et al., 2013; Crusciol et al., 2014). Essa exposição pode implicar na redução da QFS, reduzindo a eficiência de uso da água e assim comprometer o sucesso no estabelecimento do SPD (Pittelkow et al., 2015).

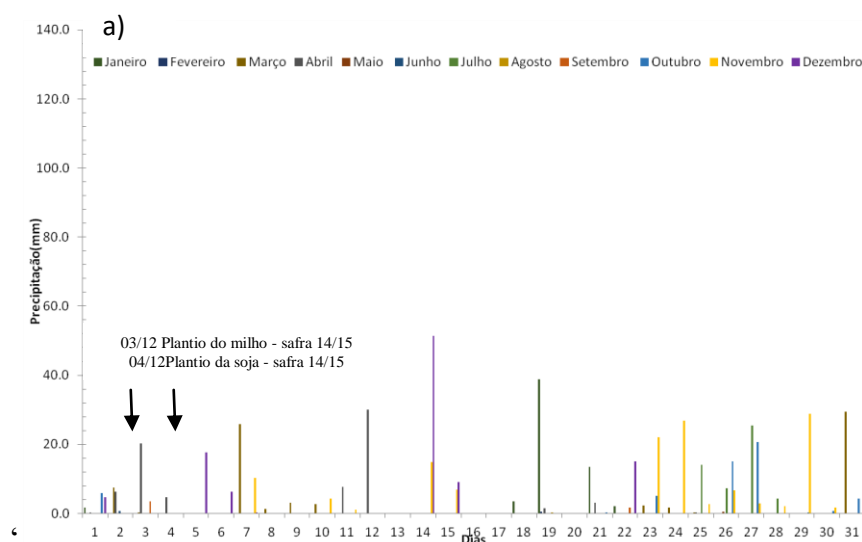
Além da rotação de culturas (Håkansson et al., 1998; Olibone et al., 2010), uma estratégia de manejo é a introdução de espécies de capins perenes, como braquiária (*Uruclia spp.*), como cultivo intercalar nas safras de grãos como em soja (Crusciol et al., 2014, 2012) e milho (Borghetti et al., 2013). Resultados positivos têm sido encontrados para a cultura subsequente, tanto em produtividade quanto em melhoria na fertilidade química (Balbinot et al., 2017; Crusciol et al., 2015; Pariz et al., 2017), além da qualidade física do solo avaliada pela resistência a penetração (Calonego et al., 2011; Pariz et al., 2017, 2016) e IHO (Calonego et al., 2011) em sistemas de integração lavoura-pecuária.

Dessa forma, este estudo foi conduzido para testar a hipótese de que a introdução de braquiária em cultivo intercalar com grãos (soja ou milho), aliado à rotação de culturas, na fase inicial do SPD, promove melhoria na QFS para produção de grãos em regiões com limitação hídrica. Os objetivos específicos foram: 1: Quantificar, modelar e fazer interpretações quanto a QFS medida pelo IHO e IHO\* em função do sistema de manejo; 2: Identificar por meio do IHO e IHO\* qual atributo físico é mais limitante às plantas; 3: Avaliar a influência da QFS na produtividade de grãos nos dois primeiros anos de estabelecimento do SPD sob diferentes manejos.

## 2. Material e Métodos

### 2.1. Local e implantação do experimento de campo

O experimento foi conduzido em Sete Lagoas, região central do estado de Minas Gerais (19°28'30'' S, 44°15'08'' W). O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 2013), correspondente a Typic Haplustox, contendo 690, 120 e 190 g kg<sup>-1</sup> de argila, silte e areia respectivamente, e mineralogia com predomínio de caulinita. O clima é classificado segundo Köppen, como subtropical úmido (Cwa), com temperatura média anual de 22,1°C e índice pluviométrico anual de 1.382,7 mm, volume concentrado entre outubro a abril. A figura 1a-c mostra a precipitação de Janeiro de 2014 a Abril de 2016.





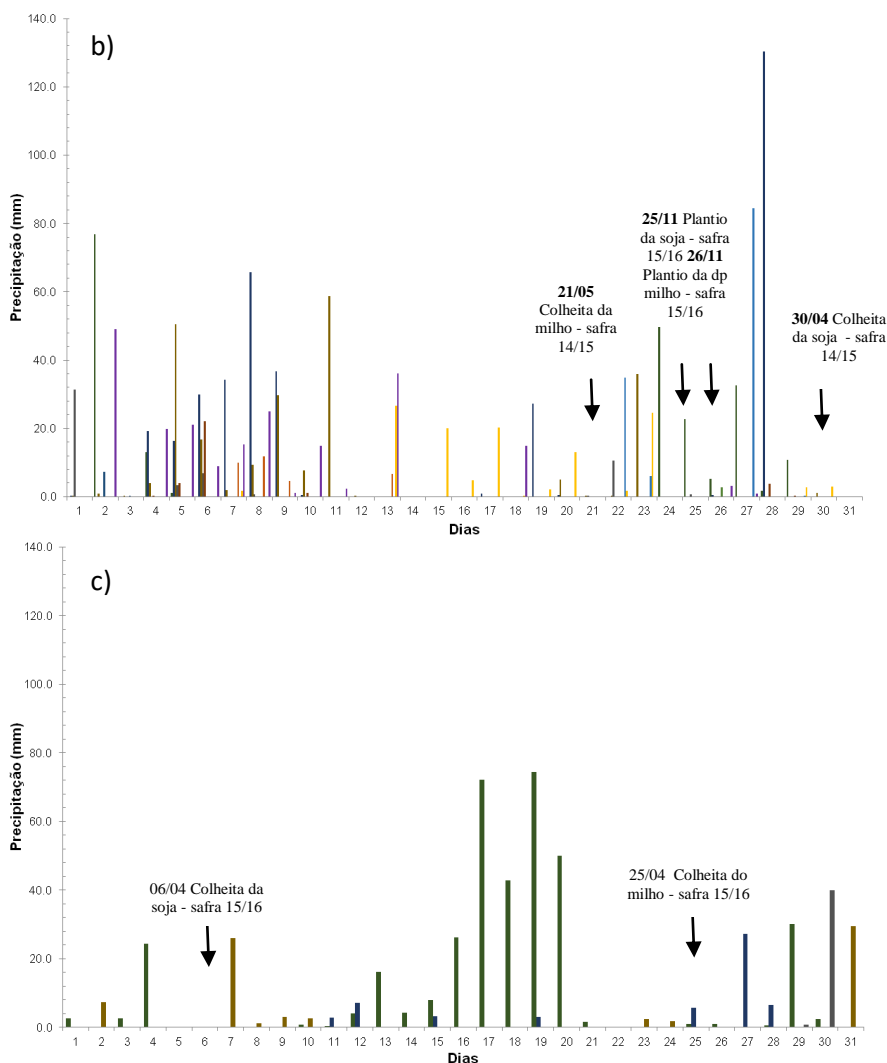


Figura 1: Precipitação de Janeiro de 2014 a Abril de 2016, período que inclui a fase anterior a implantação do experimento até a colheita da última safra avaliada. As setas indicam as datas de plantio e colheita dos cultivos de soja e milho nas safras 2014/2016 e 2015/2016.

A área experimental foi implantada a partir do ano de 2014, em sequeiro. Nos 20 anos anteriores à implantação do experimento, a área foi utilizada para o cultivo de milho e soja. De agosto a outubro de 2014, para a implantação dos tratamentos em SPD houve mobilização do solo em área total por meio de preparo convencional visando a eliminação de camadas de impedimento, incorporação de corretivos e fertilizantes. Antecedendo à semeadura do experimento, no mês de julho de 2014, foi realizada amostragem do solo para caracterização química da área experimental na profundidade de 0 a 20 cm. Os resultados demonstraram os seguintes valores: pH em água 5,9; carbono orgânico total  $20 \text{ gKg}^{-1}$ ; teores de P e K (Mehlich 1) de 2 e  $17 \text{ mg dm}^{-3}$ , respectivamente; Ca  $3,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ; saturação por bases de 39%; Saturação por Al de 4,7%. As recomendações de corretivos seguiram os resultados da análise química,

sendo as quantidades calculadas de acordo com as recomendações de Sousa e Lobato, (2004).

Em agosto de 2014 foi efetuada subsolagem em área total até a profundidade de 35 cm. Em setembro de 2014, foi realizada a calagem com 4 t ha<sup>-1</sup> de calcário, dividida em 2 aplicações, sendo a primeira incorporada com arado de aiveca e a segunda com grade aradora. Em outubro/2014 foram realizadas aplicações de gesso agrícola (3 t ha<sup>-1</sup>), cloreto de potássio (306 kg ha<sup>-1</sup>), FTE BR12 (93 kg ha<sup>-1</sup>) e superfosfato simples (1.1 t ha<sup>-1</sup>), incorporados com grade niveladora. Em dezembro/2014, após o início da estação chuvosa, fez-se a semeadura das culturas em função dos tratamentos.

## 2.2. Sistemas de cultivo

Os tratamentos consistiram na combinação entre sistemas de cultivo e níveis de investimento em adubação. A combinação entre os fatores considerou as características climáticas de Sete Lagoas, que impedem o cultivo no período de outono-primavera. Os níveis de investimento em adubação se referem às necessidades nutricionais completamente ou parcialmente atendidas, com base nas demandas para elevadas produtividades de grãos de milho e de soja (Resende et al., 2016).

A descrição dos tratamentos está descrita na Tabela 1. Na Tabela 2 estão descritas as quantidades de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O aplicados na semeadura das culturas para cada um dos tratamentos. Em razão da uniformização das características químicas e físicas da área experimental antes da implantação dos sistemas de cultivo, cada tratamento ocupou 0,5 ha, de forma a disponibilizar área de amostragem suficiente para as avaliações físicas ao longo da condução do experimento, além de não comprometer as avaliações de produtividade de grãos das culturas nos dois anos agrícolas.

Tabela 1: Sistemas de cultivo e níveis de investimento em adubação empregados.

Tratamento	Nível de investimento em adubação	Ano agrícola 2014/2015		Ano agrícola 2015/2016	
		Verão	Outono-Primavera	Verão	Outono-Primavera
1	Médio	Soja	Pousio	Soja	Pousio
2	Médio	Milho	Pousio	Milho	Pousio
3	Médio	Milho	Pousio	Soja	Pousio
4	Médio	Milho+braquiária	Braquiária	Soja+braquiária	Braquiária
5	Alto	Soja+braquiária	Braquiária	Milho+braquiária	Braquiária
6	Alto	Soja	Pousio	Milho	Pousio

Tabela 2: Caracterização dos níveis de investimento em adubação em razão das quantidades de nitrogênio (N), fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e potássio (K<sub>2</sub>O) pelas culturas semeadas em cada ano agrícola.

Tratamento	Ano Agrícola	Cultura	Adubação, kg ha <sup>-1</sup>		
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
1	2014/15	Soja	8,2	82	82
	2015/16	Soja	7	70	70
2	2014/15	Milho	33,2	116,2	66,4
	2015/16	Milho	24	84	48
3	2014/15	Milho	33,2	116,4	66,4
	2015/16	Soja	7	70	70
4	2014/15	Milho	33,2	116,2	66,4
	2015/16	Soja	7	70	70
5	2014/15	Soja	9,6	95,8	95,8
	2015/16	Milho	36	126	72
6	2014/15	Soja	9,6	95,8	95,8
	2015/16	Milho	36	126	72

Em cada ano agrícola, nos sistemas de cultivo onde houve semeadura do milho, foi feita adubação de cobertura para suprimento de N. Aplicou-se 70 kg ha<sup>-1</sup> de N, correspondendo a 155 kg ha<sup>-1</sup> do fertilizante Uréia para os tratamentos 2, 3 e 4, e, 90 kg ha<sup>-1</sup> de N, correspondendo a 200 kg ha<sup>-1</sup> do fertilizante ureia para os tratamentos 5 e 6. As populações de plantas das culturas produtoras de grãos seguiram as recomendações para cada cultivar, assim como a adoção dos tratamentos culturais para o tratamento de sementes, controle de plantas daninhas, pragas e doenças.

Além disso, nos sistemas de cultivo 4 e 5, onde houve a semeadura da braquiária, foi utilizada a espécie *Urochloa ruziziensis* na quantidade de 4 kg ha<sup>-1</sup> de sementes puras viáveis. No milho, o consórcio foi simultâneo na linha de cultivo, para tanto, as sementes da forrageira foram misturadas ao fertilizante de semeadura e distribuídas mecanicamente no solo por meio de semeadora-adubadora. Na soja, o consórcio foi estabelecido com a semeadura da forrageira a lanço quando a cultura granífera encontrava-se no estágio de desenvolvimento R<sub>5</sub>, conforme metodologia descrita em Andrade et al. (2017). Ao final do experimento, no mês de novembro de 2016, foi realizada amostragem do solo para fins de fertilidade na profundidade de 0-20 cm em função dos tratamentos empregados, sendo os resultados demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3: Caracterização química do solo após a colheita das culturas no segundo ano agrícola de implantação dos tratamentos.

Tratamentos	pH <sub>H2O</sub>	V	COT	m	CTC	Ca	K	P
		%	%	%	cmolc dm <sup>-3</sup>	cmolc dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>
T1	5,88	62	1,8	0,8	12,3	5,6	174	11
T2	5,70	53	1,8	1,1	12,3	4,9	119	21
T3	5,67	55	1,9	1,1	11,9	4,9	141	13
T4	5,75	50	1,9	1,9	10,1	3,5	111	8
T5	5,77	42	1,9	2,4	9,4	2,6	133	13
T6	6,07	51	1,8	1,5	9,8	3,5	143	19

Valores médios para os tratamentos: V = Saturação por Bases, COT = Carbono Orgânico Total, m = Saturação por Alumínio, CTC = Capacidade de Troca Catiônica; Ca = Cálcio, K = Potássio e P = Fósforo.

### 2.3. Amostragem dos atributos físicos do solo para modelagem do IHO

Em julho de 2015 (safra 2014/2015) e março de 2016 (safra 2015/2016) foram coletadas amostras indeformadas de solo utilizando cilindros metálicos para determinação da densidade do solo, nas camadas de 0-5 cm e 15-20 cm. Essas camadas foram definidas após testes prévios com penetrômetro de impacto, sendo as que apresentaram maior resistência à penetração, sugerindo maior limitação ao crescimento de raízes. A amostragem ocorreu em três pontos escolhidos aleatoriamente dentro de cada tratamento, por meio de uma malha georreferenciada determinada previamente.

### 2.4. Determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO)

O IHO foi determinado conforme a metodologia preconizada por Silva et al. (1994) e Silva et al. (2015). Em laboratório, as amostras coletadas na safra 2015/2016 foram preparadas, saturadas e divididas em 7 grupos de 36 amostras. Cada grupo foi equilibrado a um dos seguintes potenciais ( $\Psi$ ): -4, -6 e -10 kPa, em mesa de tensão automatizada marca EcoTech; e -33, -100, -500 e -1500 kPa, em câmaras de Richards. Após equilíbrio, as amostras foram pesadas e submetidas ao teste de resistência à penetração (RP).

A RP foi medida com ponteira metálica cônica de 4 mm de diâmetro de base, ângulo de 30°, a uma velocidade constante de 10 mm min<sup>-1</sup> (Serafim et al., 2013; Silva et al., 2015), pelo equipamento Texture Analyser TA.XT Plus. Após determinação da RP, as amostras foram secas em estufas com a temperatura de  $\pm 105$  °C até peso

constante, para determinação da densidade do solo ( $D_s$ ) e do conteúdo de água do solo ( $\theta$ ). Os dados de RP,  $D_s$  e  $\theta$  foram utilizados para ajuste do modelo não linear de Busscher (1990) e obtenção da curva de RP (CRP, Equação 1).

$$RP = d\theta^e D_s^f \quad (1)$$

Onde: RP= resistência do solo à penetração (MPa);  $D_s$ = densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ );  $\theta$  = conteúdo de água do solo ( $m^3\ m^{-3}$ ); e d, e, f são os coeficientes obtidos no ajuste dos dados à equação 1.

Os dados de  $D_s$  e retenção de água foram ajustados ao modelo elaborado por Silva et al. (1994) e apresentado na forma não linear (Leão e da Silva, 2004; Silva et al., 2015), por apresentar melhores resultados, para modelagem da curva de retenção de água no solo (CRA, Equação 2).

$$\theta = a\Psi^b D_s^c \quad (2)$$

Onde:  $\theta$  = conteúdo de água no solo ( $m^3\ m^{-3}$ );  $\Psi$ = potencial da água no solo em módulo (kPa);  $D_s$  = densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ ), e a, b, c são os coeficientes obtidos no ajuste dos dados à equação 2.

O cálculo do IHO seguiu a metodologia empregada por Tormena et al. (1999) e Leão e da Silva (2004), pela diferença entre os limites superior e inferior, escolhidos pelos atributos físicos mais limitantes para a planta em cada amostra. Como o limite superior, o  $\theta$  na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), estimado no potencial de -6 kPa (Silva et al., 2014), obtido pela equação 2, ou, o  $\theta$  em que a porosidade de aeração é de  $0,10\ m^3\ m^{-3}$  ( $\theta_{PA}$ ) (Grable and Siemer, 1968), o que for menor (ou seja, mais restritivo). O  $\theta_{PA}$  foi calculado conforme descrito pela equação 3.

$$\theta_{PA} = \left(1 - \frac{D_s}{D_p}\right) - 0,1 \quad (3)$$

Onde:  $\theta_{PA}$  = conteúdo de água no solo na porosidade mínima de  $0,10\ m^3\ m^{-3}$ ;  $D_s$  = densidade do solo  $Mg\ m^{-3}$ ;  $D_p$  = densidade de partículas assumida em  $2,65\ Mg\ m^{-3}$ .

Como limite inferior,  $\theta$  no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), que foi estimado no potencial de -1500 kPa (Savage et al., 1996), obtido pela equação 2, ou, no  $\theta$  em que a RP atinge 2 MPa considerada crítica às raízes ( $\theta_{RP}$ ), o que for maior. O valor de RP crítica abaixo do qual ocorre redução na alongação de raízes para milho e soja, apresentado na literatura, varia de 2 a 3 MPa (Bengough et al., 2011; Bengough and Mullins, 1990; Klein and Camara, 2007; Moraes et al., 2014). Adotou-se 2 MPa, uma vez que áreas avaliadas estão em fase inicial de estabelecimento do SPD, e assim há provavelmente pouca presença de “bioporos” e portanto menos caminhos facilitadores ao crescimento das raízes (Klein and Camara, 2007). O  $\theta_{RP}$  foi calculado conforme descrito pela equação 4.

$$\theta_{RP} = \left( \frac{RPc}{d Ds^e} \right)^{1/f} \quad (4)$$

Onde:  $RPc$  = resistência do solo à penetração crítica à elongação de raízes;  $\theta_{RP}$  é conteúdo de água no solo no qual a  $RPc$  ocorre e  $d$ ,  $e$ ,  $f$  são os coeficientes obtidos no ajuste dos dados à equação 4.

#### 2.4.1. Incorporação da umidade crítica para as culturas no IHO

Considerando que antes que o solo alcance  $\theta_{PMP}$  a cultura pode reduzir sua transpiração potencial máxima e assim comprometer seu potencial produtivo, particularmente nos Latossolos argilosos da região do Cerrado brasileiro que de água para as plantas (Carducci et al., 2011; Silva et al., 2014). Ao utilizar a umidade crítica ( $\theta^*$ ) no apresentam poucos poros de tamanho intermediário, responsáveis pela disponibilidade IHO (IHO\*) buscou-se melhorar sua acurácia e sua relação com a produtividade de grãos, a partir do fator de disponibilidade de água ( $p$ ), conforme metodologia preconizada por Silva et al. (2015). Nesse procedimento se aplica o conceito de água prontamente disponível [ $\theta_{CC} - \theta^* = (\theta_{CC} - \theta_{PMP})p$ ] em que apenas parte da capacidade de água disponível do solo ( $\theta_{CC} - \theta_{PMP}$ ) mantém a transpiração máxima da cultura, portanto, sem estresse hídrico significativo (Denmead e Shaw, 1962; Allen et al., 1998; Eitzinger et al., 2004). O fator  $p$  empregado foi padronizado para os cultivos, levando em consideração os estádios fenológicos das culturas principais presentes no momento da amostragem (milho e soja). Foi adotado o fator 0,55, com base numa evapotranspiração média de 4 mm dia<sup>-1</sup>, segundo Allen et al. (1998). A  $\theta^*$  foi calculada conforme descrito na equação 5. O IHO\* foi calculado conforme Silva et al. (2015), substituindo-se  $\theta_{PMP}$  por  $\theta^*$ .

$$\theta^* = a \left\{ \left[ 6^b - p(6^b - 1500^b) \right]^{\frac{1}{b}} \right\} Ds^c \quad (5)$$

Onde:  $\theta^*$  = umidade crítica abaixo do qual há redução da transição máxima da cultura, m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>;  $p$  = fator de depleção da água disponível no solo considerando evapotranspiração da cultura; 6 e 1500 = valores de potencial matricial em módulo para estimativa da capacidade de campo e ponto de murcha respectivamente, kPa;  $Ds$  = densidade do solo, Mg m<sup>-3</sup>; e  $a$ ,  $b$ ,  $c$  são coeficientes de ajuste do modelo obtido pela equação 2.

#### 2.5. Relação entre produtividade das culturas e os atributos do solo

A produtividade de grãos ( $Pg$ ) em cada tratamento foi calculada a partir da coleta de todas as espigas contidas em três linhas de três metros de comprimento em cada ponto georreferenciado. Após debulha, os grãos foram pesados e a produtividade

de grãos estimada em  $\text{kg ha}^{-1}$  (13% base úmida). Os dados de produtividade foram agrupados por cultura, considerando as duas safras, para análise de sua relação com os atributos físicos do solo. Também foi calculada a produtividade relativa de grãos (Prg) para cada tratamento, para avaliar sua relação com os atributos físicos e químicos do solo. Para tal, a partir da produtividade máxima de cada cultura (milho ou soja), em cada safra, foram calculadas as produtividades relativas pela proporção em relação ao tratamento com maior produtividade, de acordo com o cálculo proposto por Borghi et al. (2013), e posteriormente calculadas as médias dos dois anos agrícolas para cada tratamento.

Os atributos físicos do solo avaliados nas profundidades 0-5 cm e 15-20 cm, e a média dessas profundidades, considerada 0-20 cm, foram correlacionados às variáveis de produtividade (Pg e Prg). A densidade média em cada tratamento (DsMed) (Benjamin et al., 2003), o IHO (Benjamin et al., 2003; Gathala et al., 2011; Verma and Sharma, 2008), IHO\*, razão entre a Ds e densidade crítica do IHO (Ds/DscIHO), razão entre Ds e a densidade crítica do IHO\* (Ds/DscIHO\*) e densidade máxima que ocorreu nos tratamentos (DsMax) foram correlacionados com Pg. Para as correlações, O IHO e IHO\* foram obtidos a partir da DsMed e da DsMax.

A Prg foi correlacionada com a DsMed, IHO (Benjamin et al., 2003; Gubiani et al., 2013), Ds/DscIHO (Cecagno et al., 2016), IHO\*, Ds/DscIHO\*, DsMax e também com atributos químicos do solo, carbono orgânico total e saturação por bases (Tabela 3). Para estas variáveis, os dados foram agrupados de acordo com cada tratamento e os dois anos agrícolas foram analisados separadamente.

## **2.7. Análise estatística**

Os parâmetros  $a, b, c, d, e$  e  $f$  dos modelos não lineares do IHO foram obtidos por minimização da soma dos quadrados da diferença entre os valores determinados e estimados pelos modelos, para tal, foram utilizados algoritmos de planilhas eletrônicas, conforme indicado na literatura (Leão e da Silva, 2004; Safadoust et al., 2014; Silva et al., 2015). A acurácia dos modelos foi avaliada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e pela raiz do erro médio quadrático (RMSE) entre os valores determinados e estimados pelos modelos (Chen et al., 2014; Safadoust et al., 2014; Silva et al., 2015). Foi feita a estatística descritiva para toda a base de dados. O IHO foi plotado em função da variação da Ds considerando as variações causadas pelos manejos de intensificação

(Silva et al., 1994; Silva et al., 2015). A relação entre a produtividade e os atributos do solo foi avaliada por Correlação Linear de Pearson, a 0,05 de significância.

### 3. Resultados

#### 3.1. Estatística descritiva e dos modelos de curva de retenção de água e curva de resistência a penetração

As amplitudes dos valores de Ds e RP foram semelhantes nas duas profundidades avaliadas, sendo possível notar maior variabilidade dos dados de RP, quando comparados com os dados de Ds. Para a profundidade de 0-5 cm, a amplitude dos dados de Ds foi de 0,85 Mg m<sup>-3</sup> a 1,35 Mg m<sup>-3</sup> e o coeficiente de variação foi de 8,37%. Para RP, os valores variaram entre 0,15 MPa e 5,27 MPa e o coeficiente de variação foi de 83,4%. Os modelos de curva de retenção de água (CRA) e curva de resistência à penetração (CRP), resultantes para profundidade de 0-5 cm (n=126) foram:  $\Theta = 0,4496 * (\Psi^{0,084501}) * (Ds^{0,7944})$  e  $RP = 0,0031 * (\theta^{-4,9766}) * (Ds^{7,4321})$ . Ambos apresentaram bom ajuste, com R<sup>2</sup> de 0,93 para CRA e 0,78 para CRP, os valores de erro médio quadrático (RMSE) foram 0,018 e 0,616 respectivamente.

Para a profundidade de 15-20 cm, os dados de densidade variaram de 0,90 Mg m<sup>-3</sup> a 1,39 Mg m<sup>-3</sup> e o coeficiente de variação foi de 7,60%. Para a RP a variação foi entre 0,167 MPa e 5,71 MPa e o coeficiente de variação foi de 89,23%. Os modelos de CRA e CRP resultantes para profundidade de 15-20 cm (n=126) foram:  $\Theta = 0,4445 * (\Psi^{0,082}) * (Ds^{0,7299})$  e  $RP = 0,0029 * (\theta^{-5,01}) * (Ds^{7,5055})$ . Assim como na profundidade de 0-5 cm, os modelos apresentaram bons ajustes, com R<sup>2</sup> de 0,91 para CRA e 0,83 para CRP, os valores de RMSE foram 0,018 e 0,59 respectivamente.

#### 3.2. Restrições mecânicas e de aeração à disponibilidade de água no solo modeladas pelo IHO e IHO\*

Os resultados de IHO e IHO\* estão apresentados nas Figuras 2a,b para a profundidade de 0-5 cm e 3a,b para profundidade de 15-20 cm. Nas duas profundidades ocorreram limitações físicas de aeração e resistência mecânica às plantas, com diferenças ao comparar IHO e IHO\*, com destaque para maior limitação hídrica em relação mecânica para o IHO\*.

Para a profundidade de 0-5 cm os resultados indicam que a limitação por aeração foi menor que a mecânica e a hídrica, e só ocorre em Ds acima de 1,19 Mg m<sup>-3</sup> (Figura



2a), com  $\Theta_{PA}$  substituindo o  $\Theta_{CC}$  como limite crítico superior, resultando em menores valores de IHO e IHO\*, reduzindo a QFS. Considerando o IHO, a restrição mecânica foi a mais severa, sendo possível observar que para todos os valores de  $D_s$ , o IHO apresentou restrição mecânica ao acesso a água disponível no solo, uma vez que o  $\Theta_{RP}$  é mais limitante que  $\Theta_{PMP}$ , mesmo para os menores valores  $D_s$  observados no solo (Figura 2a). No entanto, ao considerar o IHO\* como indicador de QFS, o  $\Theta^*$  foi mais limitante que o  $\Theta_{RP}$ , implicando restrição hídrica mais severa que a restrição mecânica (Figura 2a). No modelo do IHO\*, a restrição mecânica foi superior a hídrica somente a partir da  $D_s$  de  $1,18 \text{ Mg m}^{-3}$ , a partir desse valor de  $D_s$   $\Theta_{RP}$  foi maior que o  $\Theta^*$  (Figura 2a), e assim IHO e IHO\* assumiram os mesmos valores (Figura 2b). Devido a esse comportamento, a faixa de umidade no solo considerada ótima para a planta aumenta até  $1,18 \text{ Mg m}^{-3}$  e depois reduzindo-se com maiores valores de  $D_s$ , considerando o IHO\*. Em contrapartida, qualquer aumento da  $D_s$  sempre acarretou em diminuição do IHO (Figura 2b). Neste sentido, o aumento da  $D_s$  até  $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ , acarreta maior restrição física indicada pelo IHO e IHO\*, em que esses assumem o valor zero, ocorrendo, portanto, a densidade crítica ( $D_{sc}$ ) ao desenvolvimento das plantas.

Comportamento similar ocorreu para profundidade de 15-20 cm, como mostrado nas Figuras 3a e 3b, onde foi possível observar que a  $D_{sc}$  do IHO e IHO\* também foi  $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ . Os resultados indicam que a limitação por aeração foi menor que a mecânica e a hídrica, e só ocorre em  $D_s$  acima de  $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$ , onde  $\Theta_{PA}$  substitui o  $\Theta_{CC}$ . O  $\Theta_{PMP}$  foi sempre menor que o  $\Theta_{RP}$  para toda faixa de  $D_s$  (Figura 3a), indicando que para o IHO ocorreu sempre restrição mecânica antes da hídrica. Porém, ao considerar o IHO\* como indicador de QFS, o  $\Theta^*$  foi mais limitante que o  $\Theta_{RP}$ , implicando restrição hídrica mais severa que a restrição mecânica (Figura 3a). No modelo do IHO\*, a restrição mecânica foi superior a hídrica somente a partir da  $D_s$  de  $1,17 \text{ Mg m}^{-3}$ , a partir desse valor de  $D_s$  o  $\Theta_{RP}$  foi maior que o  $\Theta^*$  (Figura 3a), e assim IHO e IHO\* assumiram os mesmos valores (Figura 3b). Ao comparar as duas profundidades avaliadas, não fica clara uma tendência de maior restrição física às plantas em uma delas, tendo vista a semelhança entre os valores de  $D_s$  que ocorrem limitações hídricas, mecânicas e de aeração, além de apresentarem o mesmo valor de  $D_{sc}$  para o IHO e IHO\*.

Com relação a capacidade do solo em fornecer água sem limitações físicas as plantas, quantificado pela magnitude do IHO e pelo IHO\* (Figuras 2b e 3b), calculados com a  $D_{sMed}$  de cada profundidade, verificou-se também pouca diferença entre as duas

profundidades. Comparando as duas profundidades, houve 5,5% de incremento na amplitude do IHO para a camada de 0-5 cm com relação a camada de 15-20 cm ( $0,109 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para a camada de 0-5 cm e  $0,103 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para camada de 15-20 cm). Com relação ao IHO\*, o incremento foi de 16%, no entanto, a maior amplitude foi encontrada na profundidade de 15-20 cm ( $0,087 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  de 0-5 cm e  $0,101 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  de 15-20 cm).

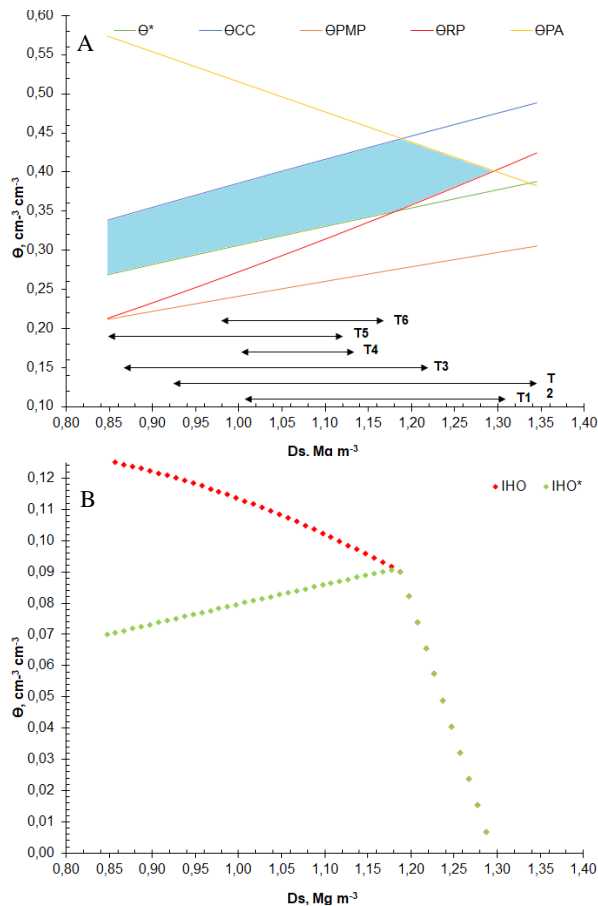


Figura 2: Modelagem da variação do conteúdo de água na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), na resistência a penetração de 2 MPa ( $\theta_{RP}$ ), na unidade crítica para as culturas ( $\theta^*$ ), na porosidade de aeração de  $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  ( $\theta_{PA}$ ) com a densidade do solo para profundidade de 0-5 cm. (a): As setas representam a amplitude da variação da  $D_s$  para cada tratamento/sistema de manejo avaliado. A área colorida representa a faixa do IHO\* para o solo. (b): Variação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e Intervalo Hídrico Ótimo com inserção do  $\theta^*$  (IHO\*) com a densidade do solo.

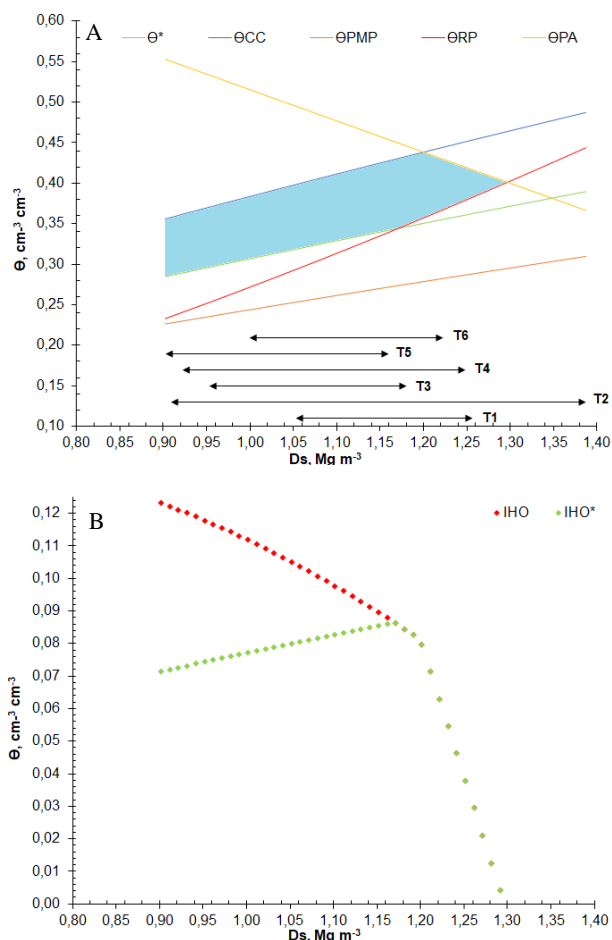


Figura 3: Modelagem da variação do conteúdo de água na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), na resistência a penetração de 2 MPa ( $\theta_{RP}$ ), na umidade crítica para as culturas ( $\theta^*$ ), na porosidade de aeração de  $0,10 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  ( $\theta_{PA}$ ) com a densidade do solo para profundidade de 15-20 cm (a): As setas representam a amplitude da variação da  $D_s$  para cada tratamento/sistema de manejo avaliado. A área colorida representa a faixa do IHO\* para o solo. (b): Variação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e Intervalo Hídrico Ótimo com inserção do  $\theta^*$  (IHO\*) com a densidade do solo.

### 3.3. Efeitos dos sistemas de manejo sobre o IHO e IHO\* nas safras 2014/2015 e 2015/2016

Utilizando a  $D_s$ Med que ocorreu em cada sistema de manejo para compará-los, verifica-se que porosidade mínima de aeração não foi limitante nessas condições, com o  $\theta_{CC}$  sempre como limite superior do IHO, para as duas profundidades e safras avaliadas (Tabela 4). Para o limite inferior do IHO, o  $\theta_{RP}$  foi mais limitante que o  $\theta_{PMP}$ , indicando que a restrição mecânica ocorre antes da hídrica em todos os tratamentos (sistemas de manejo). Por outro lado, em todos os tratamentos para o IHO\* o limite inferior foi o  $\theta^*$ . Também, em nenhum sistema de manejo, a  $D_s$ Med alcançou a  $D_{sc}$  (Tabela 4), sugerindo que a limitação física severa foi pouco frequente.

Ao comparar as safras 2014/2015 e 2015/2016 é possível observar em todos os tratamentos uma redução no IHO na segunda safra avaliada, para a profundidade de 0-5 cm (Tabela 4), o mesmo ocorre na profundidade de 15-20 cm, com exceção ao T3. A contraposto o IHO\* foi sempre maior ou igual na safra 2015/2016 para 15-20 cm, ou seja, por esse indicador é possível apontar que houve melhora na QFS na segunda safra avaliada. Essa diferença se dá pela maior restrição no IHO\* causada pelo  $\Theta^*$  em relação à limitação mecânica.

Com relação à intensificação de cultivos, nos dois anos agrícolas, os monocultivos (T1 e T2) apresentaram os menores valores de IHO na profundidade de 0-5 cm (Tabela 4). Em relação aos monocultivos, os cultivos em rotação milho e soja (T3 e T6), apresentaram um incremento de 7,44% no IHO já na primeira safra avaliada e 10,66% na segunda safra após a implantação. O mesmo ocorreu com os cultivos contendo braquiária como cultura intercalar, tanto na safra 2014/2015, com 4,65% de incremento, quanto na safra 2015/2016, com 12,18%. Dessa forma, destaca-se o efeito positivo da intensificação de cultivos, uma vez que o maior valor do IHO indica menores restrições por aeração, elevada resistência do solo a penetração de raízes, ou seja, maior QFS.

Já para o IHO\*, os maiores valores foram encontrados nos monocultivos, ao considerar as duas safras houve uma redução média de 6,15% com relação a rotação milho e soja e 5,52% com relação aos cultivos com braquiária como cultura intercalar. Para safra 2015/2016, os resultados do IHO\* mostram uma redução nos valores dos demais tratamentos quando foram comparados aos monocultivos, para a profundidade de 0-5 cm, foi de 3,59% para os tratamentos contendo rotação milho e soja e 5,09% com relação ao IHO\* dos tratamentos contendo braquiária como cultivo intercalar. Considerando a profundidade de 15-20 cm, destaca-se que os monocultivos (T1 e T2) apresentaram IHO médio menor (9,92%) que os demais tratamentos, ao considerar de forma conjunta as duas safras avaliadas (Tabela 4). Para profundidade de 15-20 cm a redução do IHO dos monocultivos foi de 4,12% para os tratamentos contendo rotação milho e soja e 5,88% para os tratamentos contendo cultivo intercalar com braquiária.

Tabela 4: Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e Intervalo Hídrico Ótimo com a umidade crítica adicionada ao modelo (IHO\*) calculados com a DsMed em cada sistema de manejo (tratamentos), nas duas primeiras safras após estabelecimento de SPD utilizando modelos apresentados nas Figuras 2 e 3.

Tratamento	DsMed Mg m <sup>-3</sup>	IHO cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	IHO* cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	DsMed Mg m <sup>-3</sup>	IHO cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	IHO* cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>
------------	-----------------------------	---	--	-----------------------------	---	--

Safra	2014/2015			2015/20216		
0-5 cm						
T1	1,05	0,108	0,083	1,15	0,096	0,089
T2	1,06	0,107	0,083	1,11	0,101	0,086
T3	0,99	0,115	0,079	1,01	0,113	0,080
T4	1,05	0,108	0,083	1,06	0,107	0,083
T5	0,96	0,117	0,077	1,00	0,114	0,079
T6	0,97	0,116	0,077	1,08	0,105	0,084
15-20 cm						
T1	1,05	0,105	0,080	1,15	0,089	0,085
T2	1,11	0,098	0,083	1,14	0,091	0,085
T3	1,06	0,104	0,080	1,05	0,105	0,080
T4	1,06	0,104	0,080	1,11	0,098	0,083
T5	0,99	0,113	0,076	1,00	0,112	0,077
T6	1,01	0,110	0,078	1,10	0,096	0,083

DsMed: densidade média em cada tratamento; IHO (Intervalo Hídrico Ótimo) e IHO\* (Intervalo Hídrico Ótimo, com a umidade crítica adicionada ao modelo) em cada tratamento.

O IHO e o IHO\* também foram obtidos a partir da densidade máxima que ocorreu em cada tratamento (DsMax) (Tabela 5). Comparando os dois indicadores, no geral o IHO foi maior que o IHO\*, ou seja, o  $\Theta^*$  foi mais limitante que  $\Theta_{RP}$ , assim como ocorreu para o IHO calculado com a DsMed indicando restrição hídrica mais severa que a mecânica. Exceção ocorreu para T1, T2 e T3 na safra 2015/2016, com IHO e IHO\* apresentando mesma magnitude.

Ao avaliar a intensificação de cultivos com relação à DsMax, na profundidade de 0-5 cm, os monocultivos ultrapassaram a densidade crítica (Dsc) obtida a partir do modelo de IHO e IHO\* na safra 2015/2016, atingindo valores de  $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$  e  $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$  (Tabela 5). Em contrapartida, os tratamentos contendo consórcio com a Braquiária (T4 e T5) apresentaram os menores valores de DsMax (Tabela 5), formando um gradiente em que quanto maior a intensificação de cultivos menor foi a DsMax e possivelmente melhor QFS. Isso também ocorreu para a profundidade de 15-20 cm, na safra 2015/2016, mostrando que a intensificação tem contribuído com a melhoria da QFS já na segunda safra, com redução média de  $0,085 \text{ Mg m}^{-3}$  (6,92%) na DsMax, dos demais tratamentos (T3, T4, T5 e T6) com relação aos monocultivos (T1 e T2).

Os maiores valores de IHO e IHO\* calculados com a DsMax ocorreram nos tratamentos T4, T5 e T6 na profundidade de 0-5 cm na safra 2015/2016 (Tabela 5). O T5 também se destacou na profundidade de 15-20 cm, com incremento de 86% no IHO e IHO\* em relação à média dos demais tratamentos. Portanto é possível apontar

melhoria da QFS com a diversificação de cultivos, utilizando rotação soja-milho, e ainda mais, quando é feito o cultivo intercalar com a braquiária sob alto investimento.

Tabela 5: IHO e IHO\* calculados com a DsMax em cada sistema de manejo (tratamentos), nas duas primeiras safras após estabelecimento de SPD utilizando modelos apresentados nas Figuras 2 e 3.

Tratamento	DsMax Mg m <sup>-3</sup>	IHO cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	IHO* cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	DsMax Mg m <sup>-3</sup>	IHO cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	IHO* cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>
2014/2015				2015/2016		
0-5 cm						
T1	1,10	0,102	0,086	1,31	0	0
T2	1,15	0,096	0,089	1,35	0	0
T3	1,05	0,108	0,083	1,22	0,066	0,066
T4	1,11	0,101	0,086	1,13	0,098	0,088
T5	1,04	0,109	0,082	1,12	0,100	0,087
T6	1,06	0,107	0,083	1,17	0,093	0,090
15-20 cm						
T1	1,10	0,098	0,083	1,26	0,029	0,029
T2	1,16	0,088	0,086	1,39	0	0
T3	1,15	0,089	0,085	1,18	0,084	0,084
T4	1,09	0,099	0,082	1,25	0,038	0,038
T5	1,05	0,105	0,080	1,16	0,088	0,086
T6	1,04	0,106	0,079	1,22	0,063	0,063

DsMax: densidade máxima em cada tratamento; IHO (Intervalo Hídrico Ótimo) e IHO\* (Intervalo Hídrico Ótimo, com a umidade crítica adicionada ao modelo) em cada tratamento.

### 3.4. Correlações entre atributos do solo e produtividade

Ao avaliar os cultivos contendo soja (T1, T5 e T6 na safra 2014/15 e T1, T3 e T4 na safra 2015/2016) observa-se que a produtividade de grãos não correlacionou significativamente com DsMed, IHO, IHO\* e DsMed/DsIHO em nenhuma das profundidades avaliadas (Tabela 6). No entanto, houve correlação significativa da produtividade com DsMax, DsMax/DsIHO para 15-20 cm e a média das duas profundidades (0-20 cm), assim como para IHOMax em 15-20 cm (Tabela 6). Esses resultados mostram que uma redução nos maiores valores de Ds encontrados na área experimental em relação a DsIHO, que foram associados a um aumento do IHO, implicou em maior produtividade de soja. No entanto, para os tratamentos cultivados com milho nenhuma correlação significativa com a produtividade foi encontrada, considerando DsMed ou DsMax (Tabela 6).

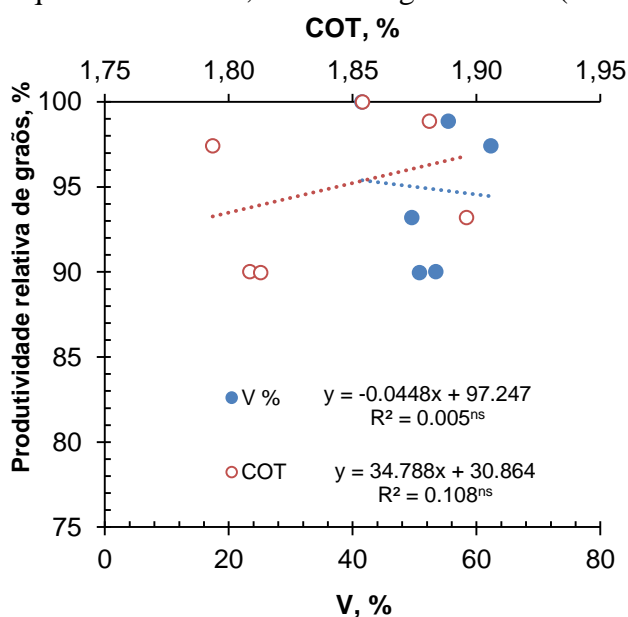
Tabela 6: Coeficientes de correlação (r) e significância (p-valor) para a relação entre as produtividades de soja e milho com os atributos físicos nas profundidades de 0-5, 15-20 e 0-20 cm.

Parâmetro	R	p valor	R	p valor
0-5 cm				
	Soja		Milho	
DsMed	-0,573	0,234	-0,237	0,651
IHO Med	0,573	0,235	0,383	0,453
IHO* Med	0,508	0,304	-0,347	0,500
DsMax	-0,737	0,095	-0,762	0,078
IHO Max	0,531	0,279	0,709	0,115
IHO*Max	0,387	0,448	0,684	0,134
DsMed/DscIHO	-0,572	0,236	-0,237	0,651
DsMax/DscIHO	-0,737	0,095	-0,762	0,078
15-20 cm				
DsMed	-0,755	0,082	-0,57	0,238
IHO Med	0,75	0,085	0,603	0,205
IHO* Med	-0,768	0,074	0,103	0,846
DsMax	-0,919	<b>0,009</b>	-0,733	0,097
IHO Max	0,819	<b>0,046</b>	0,643	0,168
IHO* Max	0,647	0,165	0,578	0,229
DsMed/DscIHO	-0,755	0,082	-0,57	0,238
DsMax/DscIHO	-0,919	<b>0,009</b>	-0,733	0,097
0-20 cm				
DsMed	-0,663	0,151	-0,416	0,412
IHO Med	0,671	0,145	0,489	0,325
IHO* Med	-0,070	0,895	-0,117	0,826
DsMax	-0,865	<b>0,026</b>	-0,763	0,077
IHO Max	0,709	0,115	0,679	0,138
IHO* Max	0,542	0,267	0,637	0,173
DsMed/DscIHO	-0,663	0,151	-0,416	0,412
DsMax/DscIHO	-0,865	<b>0,026</b>	-0,763	0,077

DsMed: densidade média  $\text{Mg m}^{-3}$ ; IHO Med (Intervalo Hídrico Ótimo, calculado a partir da DsMed)  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ; IHO\* (Intervalo Hídrico Ótimo, com a umidade crítica adicionada ao modelo, calculado a partir da DsMed)  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ; DsMax densidade máxima  $\text{Mg m}^{-3}$ ; IHO Max (Intervalo Hídrico Ótimo, calculado a partir da DsMax)  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ; IHO\* (Intervalo Hídrico Ótimo, com a umidade crítica adicionada ao modelo, calculado a partir da DsMax)  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ; DsMed/DscIHO (proporção entre a densidade média e a densidade crítica do IHO) e DsMax/DscIHO (proporção entre a densidade máxima e a densidade crítica do IHO).

Com relação aos atributos químicos do solo, não foi verificada correlação significativa entre COT e V% com a produtividade relativa de grãos (Figura 4). Esse resultado sugere baixa influência da adoção de médio ou alto investimento (Tabelas 2 e 3) na produtividade dos sistemas de manejo testados, para o tempo de duas safras avaliadas, ou seja, no estabelecimento do SPD.

Figura 4. Correlação entre produtividade relativa de grãos ao final da segunda safra e atributos químicos do solo, carbono orgânico total (COT) e saturação por bases (V%).



## 4. Discussão

### 4.1. Modelagem do intervalo hídrico ótimo para as camadas de solo mais restritivas as raízes

Ambos os modelos de IHO e IHO\* (Figuras 2 e 3) indicaram que o solo possui limitações físicas ao crescimento das plantas, porém de natureza diferente. Em solos argilosos estruturados, como o do presente trabalho, o IHO frequentemente tem como limites o  $\Theta_{CC}$  (superior) e  $\Theta_{PMP}$  (inferior), indicando mínimas limitações físicas, ou seja, ausência de restrições mecânicas e de aeração ao crescimento das plantas (Ferreira et al., 2017; Severiano et al., 2011; Silva et al., 2015). Entretanto, neste estudo o IHO indicou restrição mecânica em toda a faixa de valores de  $D_s$  encontrada, enquanto que o IHO\* apontou restrição hídrica superior a mecânica até a  $D_s$  de  $1,17 \text{ Mg m}^{-3}$ .

De forma semelhante, o IHO indicando restrições mecânicas avaliadas pelo  $\Theta_{RP}$  mais severas que a hídrica ( $\Theta_{PMP}$ ) tem sido frequentemente reportado na literatura em situações diversas de manejo e textura (Benjamin et al., 2003; Cecagno et al., 2016; Olibone et al., 2010; Silva et al., 1994; Tormena et al., 2007, 1999, 2017) no entanto, nenhum desses autores consideraram o  $\Theta^*$ . Esse resultado mostra que a compactação avaliada pelo aumento na  $D_s$  elevou a RP até alcançar 2 MPa, considerado crítica ao crescimento das raízes (Bengough et al., 2011; Safadoust et al., 2014; Silva et al., 1994), reduzindo o potencial produtivo da cultura (Benjamin et al., 2003). Com a consolidação



do SPD, estudos têm demonstrado que macroporos contínuos construídos pelas raízes das plantas e a atividade da macrofauna são preservados pela ausência de preparo do solo, formando os “bioporos”, sendo importantes rotas alternativas para atenuação da RP crítica e assim crescimento radicular das culturas subsequentes (Huang et al., 2015; Papadopoulos et al., 2014; Williams e Weil, 2004; Tormena et al., 2017).

O aumento do  $\Theta_{RP}$ , apontada em toda faixa da Ds pelo IHO pode ser minimizado pela utilização de plantas com sistema radicular robusto, capazes de penetrar camadas mais adensadas e promover a reestruturação do solo. Dessa forma, o uso de cultivo intercalar com gramíneas perenes na soja e no milho (Borghetti et al., 2013; Calonego et al., 2017; Crusciol et al., 2014, 2012; Pariz et al., 2017), podem ser importantes na reestruturação do solo e melhoria da QFS. Com relação aos tratamentos avaliados nesse trabalho a utilização da rotação de culturas e cultivo intercalar com a braquiária refletiu em menores valores de  $\Theta_{RP}$  (Figura 2 e 3), indicando efeito negativo dos monocultivos, que tiveram como consequência a diminuição da faixa de água menos limitante ao desenvolvimento das plantas.

Ao avaliar o  $IHO^*$ , o  $\Theta^*$  foi mais limitante que o  $\Theta_{RP}$  assumindo o limite inferior do  $IHO^*$  (Figuras 2 e 3), assim como encontrado por Silva et al. (2015), o que implicou maior redução da faixa de  $\Theta$  menos limitante à planta. No entanto, no presente trabalho isso ocorreu com o aumento da Ds até alcançar o valor de  $1,18 \text{ Mg m}^{-3}$  para profundidade de 0-5 cm e  $1,17 \text{ Mg m}^{-3}$  para a profundidade de 15-20 cm, sendo que para maiores Ds, o  $\Theta_{RP}$  passou a ser mais limitante. O aumento do  $\Theta^*$  com a Ds é consequência de alterações na configuração dos poros (Silva et al., 2015), com aumento na retenção de água em potenciais mais elevados devido ao manejo do solo (Tormena et al., 2017). Além das alterações modeladas pelo aumento da Ds, o  $\Theta^*$  estima a condição de máxima transpiração da cultura (Allen et al., 1998; Eitzinger et al., 2004) e, portanto, condições para alcançar maior produtividade. Sendo assim o  $IHO^*$  representa de forma mais precisa a condição física menos limitante ao desenvolvimento das plantas (Silva et al., 2015).

Com relação a aeração, somente a partir da Ds de  $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$  houve redução da porosidade mínima de aeração para abaixo de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , e portanto limitação séria da difusão de oxigênio no solo (Grable and Siemer, 1968). Em Latossolos, como o do presente estudo, a estrutura granular confere alta macroporosidade e drenagem muito rápida fazendo com que dificilmente a porosidade de aeração seja mais limitante que a resistência mecânica (Silva et al., 2015; Cecagno et al., 2016). Contrastando, Lapen et

al. (2004) observam maior restrição de aeração do que mecânica em solos mal drenados do Canadá, que correlacionou-se com redução da produtividade de milho.

Como observado pelas Figuras 2b e 3b, com o aumento da  $D_s$ , houve redução da magnitude do IHO, devido a limitação imposta pela RP (Figuras 2a e 3a) e, a partir da  $D_s$  de  $1,17 \text{ Mg dm}^{-3}$  redução do IHO\*. Menores valores de IHO e IHO\* implicam maior possibilidade de ocorrência da umidade atual do solo, durante o ciclo da cultura, ficar de fora dos limites superior e inferior desses indicadores, o que pode reduzir o potencial de crescimento e produtividade da cultura (Silva e Kay, 1997; Benjamin et al., 2003).

O aumento progressivo do  $\Theta_{RP}$  e a diminuição do  $\Theta_{PA}$ , até  $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$  (Figuras 2 e 3) resultou na densidade crítica do modelo ( $D_{sc}$ ) de IHO e IHO\* (IHO e IHO\* = 0). O valor encontrado para o solo estudado nesse trabalho está em acordo com o sugerido na literatura para solo com textura muito argilosa, calculado pela equação ( $D_{sc}=1,95-0,00095\text{Argila}$ , argila em  $\text{g kg}^{-1}$ ), proposta por Severiano et al. (2011), para Latossolos sob Cerrado, resultando em  $1,29 \text{ Mg m}^{-3}$ . Esse valor de  $D_{sc}$  também é coerente com a equação ( $D_{sc} = 1,83803-0,00078\text{Argila}$   $\text{g kg}^{-1}$ ) sugerida por Reichert et al. (2009) para solos muito intemperizados, resultando também em  $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ , o que valida os modelos desses autores para predição da  $D_{sc}$  em solos argilosos para essa condição de manejo e textura. A  $D_{sc}$  sinaliza redução severa da QFS podendo ser utilizada como ferramenta para tomada de decisão quanto a intervenção de descompactação (Silva et al., 1994).

Destaca-se que a incorporação do  $\Theta^*$  não implicou na alteração da  $D_{sc}$ , ainda assim a adição deste fator ao indicador de QFS foi de grande valia, uma vez que os valores de IHO\* foram menores do que os encontrados no IHO, indicando uma situação de limitação hídrica para as plantas mais próxima da realidade, sendo que a capacidade de extração da água retida no solo via sistema radicular foi considerada e não somente o  $\Theta_{PMP}$  (Silva et al., 2015). Tal fato aumenta as chances da umidade ficar fora da faixa do IHO\* (Silva et al., 2015) e também reforça a necessidade de se testar manejos que propiciem o aumento da amplitude do IHO\*, para diferentes situações de cultivo.

#### **4.2. Efeitos dos sistemas de manejo sobre o IHO e IHO\* nas safras 2014/2015 e 2015/2016**

Analisando os sistemas de manejo pela DsMed, os monocultivos de milho e soja (T1 e T2) apresentaram maior DsMed, o que elevou a  $\Theta_{PR}$  e conseqüentemente reduziu o IHO em relação aos demais tratamentos, sobretudo na segunda safra (Tabela 4). Na primeira safra, os menores valores de DsMed foram influenciados pelo preparo convencional do solo, realizado para implantação dos sistemas de cultivo, que conforme relatado na literatura, reduz a Ds pelo aumento da porosidade do solo (Hamza and Anderson, 2005; Stone and Silveira, 2001). Já na safra 2015/2016 os tratamentos já estavam sob o efeito da fase inicial do SPD que pode promover a elevação da Ds, comum até 20 cm de profundidade em solos argilosos (Hamza and Anderson, 2005; Nunes et al., 2015; Stone and Silveira, 2001; Tormena et al., 2002). Além do aumento da Ds, outros efeitos negativos são observados por outros autores na fase de implantação do SPD, como aumento da RP (Tormena et al., 2002), redução da macroporosidade (Soane et al., 2012) e diminuição na amplitude do IHO (Olibone et al., 2010).

Avaliando a intensificação de cultivo nos dois anos agrícolas, os sistemas que continham rotação milho e soja (T3 e T6) aumentaram o IHO, o que também foi observado por Olibone et al. (2010), após 2 anos de implantação do SPD. Porém, esses autores avaliaram lavouras com duas safras por ano agrícola, já o presente trabalho mostra o efeito positivo da rotação de culturas e SPD mesmo em situações onde as condições climáticas não permitem mais de uma safra anualmente. mesmo trabalho, os autores constataram que após dois anos de implantação do SPD, com diversificação de cultivos, houve um ganho de 2,70 no IHO, e destacam que o incremento de culturas nos sistemas produtivos, com destaque para espécies com sistema radicular vigoroso, são capazes de melhorar as propriedades físico-hídrica do solo. A melhoria da QFS com essa prática tem sido reportada em diversos trabalhos (Borghetti et al., 2013; Calonego et al., 2017; Crusciol et al., 2014, 2012; Pariz et al., 2017).

Por outro lado, o IHO\* variou pouco entre os tratamentos, sendo que os monocultivos (T1 e T2) obtiveram maior valor, explicado pelo aumento de Ds (1,15 Mg m<sup>-3</sup> e 1,11 Mg m<sup>-3</sup>) sobretudo na safra 2015/2016 (Tabela 5). Pelo modelo (Figuras 2b e 3b) é possível identificar que o IHO\* aumenta com a Ds até o valor de 1,18 na profundidade de 0-5 cm e 1,17 Mg m<sup>-3</sup> na profundidade 15-20 cm, Silva et al., (2015) também observaram maiores valores de IHO\* com a elevação da Ds.

Um efeito temporal na melhoria da QFS pode ser apontado, com os menores valores de DsMax na safra 2015/2016 nos tratamentos contendo braquiária (T4 e T5) o

que não ocorreu na safra anterior. Plantas com sistema radicular robusto e agressivo como a *Brachiaria* podem penetrar camadas de maior RP (Calonego e Rosolem, 2010) e *Ds*, formando bioporos (Williams and Weil, 2004) que aumentam o movimento de água e a difusão de gases no solo (Müller et al., 2001), reduzem a RP (Pariz et al., 2017; Chen et al., 2014; Genro Junior et al., 2004) e portanto atuam como rotas alternativas para o crescimento de raízes da próxima cultura, reduzindo os efeitos negativos da compactação do solo. Calonego et al. (2011) constataram que, quando a *Brachiaria* foi consorciada com o milho durante dois anos consecutivos, as condições estruturais do solo já foram melhoradas, reduzindo sua RP. E, que inclusive resultaram em aumento na produtividade dos cultivos seguintes (Cruciol et al., 2015).

O aumento dos valores dos indicadores IHO e o IHO\* calculados com a *DsMax* (Tabela 5) mostraram alta sensibilidade para diagnosticar as mudanças na estrutura do solo, causadas pelos sistemas de manejo, com destaque para, T4, T5 e T6 na profundidade e 0-5 cm e para T5 na profundidade de 15-20 cm, já na segunda safra após o estabelecimento do SPD. O maior aporte de biomassa vegetal nos sistemas intensificados contribui para aumento dos teores de matéria orgânica no solo (Mishra et al., 2015), contribuindo com a estruturação do solo (Calonego et al., 2011) resultando numa configuração de poros favorável a capacidade do solo em disponibilizar água as plantas (Olibone et al., 2010).

O aumento do IHO em função da adoção de sistemas de manejo conservacionistas foi relatado por diversos autores, em sistemas diversificados de cultivo (Mishra et al., 2015), modificando inclusive aspectos desfavoráveis relacionados com a textura do solo na QFS (Safadoust et al., 2014), agindo já em condições com pouco tempo de cultivo de culturas de cobertura (Chen et al., 2014), tal como o observado no presente estudo pela redução temporal da *DsMax* nos tratamentos T4 e T5, o que refletiu no aumento do IHO e IHO\*. Ferreira et al., (2017) encontraram como consequência do aumento IHO um maior desenvolvimento de raízes. Os resultados encontrados apontam para importância da adoção de sistemas intensificados de produção de grãos na melhoria da QFS, e assim na maior capacidade de disponibilizar água em solos muito argilosos e intemperizados, o que pode definir o sucesso agrônomo de cultivos em regiões com clima mais quente e ocorrência de déficit hídrico marcante.

### 4.3. Atributos do solo e produtividade

Nenhum atributo físico ou químico do solo avaliado se correlacionou com a produtividade do milho, indicando que fatores não estudados no presente trabalho interferiram na produtividade da cultura. No entanto, Verma e Sharma (2008), avaliando sistemas que envolviam rotação de culturas, cultivo de gramíneas e a fertilidade do solo, observaram correlação positiva entre a produtividade do milho e o IHO. Em contraste com os resultados desses autores, os resultados do presente trabalho sugerem que os fatores edáficos não foram os mais limitantes à produtividade do milho, ou, que os limites críticos dos indicadores de qualidade do solo não foram precisos. Nesse sentido, Gubiani et al. (2013) testaram como valores críticos de RP 2, 3 e 4 MPa, com alterações expressivas no IHO, mas sem obter correlação do IHO com a produtividade de milho. Tavares Filho et al. (2001) demonstraram que RP acima de 3,5 MPa em SPD consolidado influenciaram apenas na morfologia da planta de milho, não limitando o crescimento radicular e a produtividade dos grãos, logo a definição do  $\Theta_{RP}$  crítico para o IHO e IHO\*, no presente trabalho, pode ter sido inadequada e por isso esses indicadores não correlacionaram com a produtividade. Bengough et al (2011) ressaltam que acima de 2 MPa o crescimento radicular é afetado, contudo demonstraram a importância dos pelos radiculares que crescem nos bioporos e podem contribuir para absorção de água e nutrientes, o que não é considerado pelo penetrômetro e que pode afetar a produtividade das culturas.

Considerando que o milho é uma cultura altamente sensível a ocorrência de veranicos em períodos críticos do desenvolvimento da cultura Bergamaschi et al. (2006) e o local de estudo se caracteriza por alta frequência de veranicos, é possível inferir que a distribuição de chuvas afetou a produtividade do milho em todos os tratamentos, diluindo o efeito da variação dos atributos químicos e físicos do solo entre eles.

Por outro lado, a cultura da soja se mostrou mais sensível aos indicadores de QFS. Considerando a RP crítica de 2 MPa adotada nos modelos, que impactou expressivamente o IHO e IHO\*, sendo que outros trabalhos encontraram correlação entre produtividade de soja com RP. Beutler e Centurion (2003) observaram redução de produtividade entre 1,66 e 2,22 MPa, validando os limites adotados no presente trabalho. Beutler et al. (2007) observaram redução da produtividade da soja em RP acima de 1,30 MPa e Ds de 1,26 Mg m<sup>-3</sup>, próxima da Dsc de 1,33 Mg m<sup>-3</sup>, também em Latossolo muito argiloso. Por outro lado, Cecagno et al. (2016) não observaram

correlação entre a produtividade de soja com os indicadores IHO e DsMed/DscIHO, com Dsc observada de  $1,41 \text{ Mg m}^{-3}$  e RP crítica de 2MPa.

No presente estudo, a produtividade da soja também não correlacionou com IHO e DsMed/DscIHO. Mas, houve correlação significativa com DsMax, DsMax/DscIHO e IHOMax nas duas safras avaliadas (Tabela 6). Estes resultados indicam que mesmo pontos de Ds extremos são capazes de influenciar a produtividade. O que ocorreu principalmente na profundidade de 15-20 cm, sugerindo que em alguns dos tratamentos há compactação não controlada nessa profundidade, o que limitou a produtividade e naqueles em que houve redução da ocorrência de valores mais altos de Ds, houve maior produtividade. A presença de uma camada compactada aumenta a RP, interfere no movimento de água no solo (Kuncoro et al., 2014) e reduz a porosidade de aeração e permeabilidade do solo ao ar (Mentges et al., 2016). Como esses fatores afetam o crescimento de plantas (Letey, 1985) e podem afetar também a produtividade diretamente (Benjamin et al., 2003), faz-se necessário a adoção de medidas que promovam a melhoria da QFS e assim possibilidade de aumento de produtividade.

## 5. Conclusão

Em região com limitação hídrica, na fase de implantação do SPD para cultivo de grãos, a análise física do solo foi extremamente relevante no diagnóstico de manejos que propiciam maior capacidade do solo em disponibilizar água para as plantas. Os resultados mostraram que a capacidade do solo em fornecer água para as plantas é restringida pela umidade crítica que ocorre com o solo muito úmido e é mais limitante do que a umidade em que ocorre restrição mecânica ( $RP > 2\text{MPa}$ ) ao considerar o IHO\*. Sob maior compactação ( $Ds > 1,17 \text{ Mg m}^{-3}$ ), a restrição mecânica é mais limitante do que a hídrica ( $RP > 2\text{MPa}$ ) ao considerar o IHO\*.

Situações de alta compactação foram observadas nos monocultivos, atingindo a Dsc de  $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$  (IHO e IHO\*=0). Correlações entre produtividade de soja e o IHO ocorreram quando este foi calculado com a densidade máxima encontrada em cada sistema de manejo, sugerindo que o efeito dos cultivos intensificados em reduzir situações extremas afetou a produtividade.

Diferenças na fertilidade do solo não foram observadas no intervalo de tempo avaliado. No entanto, a redução de Ds e aumento no IHO e IHO\* indicaram que a intensificação de cultivos com rotação de culturas e, sobretudo o uso da braquiária como

planta de cobertura demonstraram-se favoráveis logo no segundo ano de implantação do sistema de plantio direto. Tal informação é importante para áreas com dificuldade climáticas para o estabelecimento de sistema de plantio direto para produção de grãos, como regiões em que há apenas um cultivo por ano agrícola e dificuldade de formação de palhada.

## 6. Referências

- Arévalo-Gardini, E., Canto, M., Alegre, J., Loli, O., Julca, A., Baligar, V., 2015. Changes in soil physical and chemical properties in long term improved natural and traditional agroforestry management systems of cacao genotypes in Peruvian Amazon. *PLoS One* 10, 1–29. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132147>
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A., Dexter, A.R., 2010. Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Plant Soil* 335, 229–244. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.06.009>
- Balbinot, A.A., Dos Santos, J.C.F., Debiasi, H., Yokoyama, A.H., 2017. Contribution of roots and shoots of *Brachiaria* species to soybean performance in succession. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 52, 592–598. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000800004>
- Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., Valentine, T. a, 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exp. Bot.* 62, 59–68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>
- Bengough, A.G., Mullins, C.E., 1990. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.* 41, 341–358. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1990.tb00070.x>
- Benjamin, J.G., Nielsen, D.C., Vigil, M.F., 2003. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma* 116, 137–148. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00098-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00098-3)
- Bergamaschi, H., Dalmago, G.A., Comiran, F., Bergonci, J.I., Müller, A. G. França, S., Santos, A.O., Radin, B ., Pereira, P.G., 2006. Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho. *Pesq.agropec.bras.Brasília* 41, 243–249.
- Beutler, A.N., Centurion, J.F., 2003. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 38, 849–856. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000700009>
- Beutler, A.N., Centurion, J.F., Da Cruz Centurion, M.A.P., Leonel, C.L., De Cássia Gomes São João, A., Da Silva Freddi, O., Centurion, M.A.P. da C., Leonel, C.L., João, A. de C.G.S., Fredd, O. da S., I, 2007. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um latossolo vermelho cultivado com soja. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 31, 1223–1232. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600001>
- Beutler, A.N., Centurion, J.F., Silva, A.P., Barbosa, J.C., 2006. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja Optimal water interval and yield of soybean cultivars. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 10, 639–645.
- Borghì, E., Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Sousa, V. V., Martins, P.O., Mateus, G.P., Costa, C., 2013. Sorghum grain yield, forage biomass production and revenue as affected by intercropping time. *Eur. J. Agron.* 51, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.08.006>
- Büchi, L., Wendling, M., Amossé, C., Jeangros, B., Sinaj, S., Charles, R., 2017. Long and short term changes in crop yield and soil properties induced by the reduction of soil tillage in a long term experiment in Switzerland. *Soil Tillage Res.* 174, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.002>
- Busscher, W.J., 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content, *Transactions of the American Society of Agricultural*



- Engineers. <https://doi.org/10.13031/2013.31360>
- Calonego, J. C., Borghi, E., Crusciol, C.A.C., 2011. Intervalo Hídrico Ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. *R. Bras. Ci. Solo* 35, 2183–2190.
- Calonego, J.C., Raphael, J.P.A., Rigon, J.P.G., Oliveira Neto, L. de, Rosolem, C.A., 2017. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *Eur. J. Agron.* 85, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.02.001>
- Campos-Herrera, R., Gómez-Ros, J.M., Escuer, M., Cuadra, L., Barrios, L., Gutiérrez, C., 2008. Diversity, occurrence, and life characteristics of natural entomopathogenic nematode populations from La Rioja (Northern Spain) under different agricultural management and their relationships with soil factors. *Soil Biol. Biochem.* 40, 1474–1484. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.01.002>
- Cecagno, D., de Andrade Costa, S.E.V.G., Anghinoni, I., Kunrath, T.R., Martins, A.P., Reichert, J.M., Gubiani, P.I., Balerini, F., Fink, J.R., de Faccio Carvalho, P.C., 2016. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Soil Tillage Res.* 156, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.005>
- Chen, G., Weil, R.R., Hill, R.L., 2014. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil Tillage Res.* 136, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.004>
- Crusciol, C.A.C., Mateus, G.P., Nascente, A.S., Martins, P.O., Borghi, E., Pariz, C.M., 2012. An innovative crop-forage intercrop system: Early cycle soybean cultivars and palisadegrass. *Agron. J.* 104, 1085–1095. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0002>
- Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Borghi, E., Soratto, R.P., Martins, P.O., 2015. Improving Soil Fertility and Crop Yield in a Tropical Region with Palisadegrass Cover Crops. *Agron. J.* 107, 2271. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0603>
- Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Mateus, G.P., Pariz, C.M., Martins, P.O., Borghi, E., 2014. Intercropping soybean and palisade grass for enhanced land use efficiency and revenue in a no till system. *Eur. J. Agron.* 58, 53–62. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2014.05.001>
- Denmead, O.T., Shaw, R.H., 1962. Availability of Soil Water to Plants as Affected by Soil Moisture Content and Meteorological Conditions1. *Agron. J.* 54, 385. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050005x>
- Derpsch, R., Franzluebbbers, A.J., Duiker, S.W., Reicosky, D.C., Koeller, K., Friedrich, T., Sturny, W.G., Sá, J.C.M., Weiss, K., 2014. Why do we need to standardize no-tillage research? *Soil Tillage Res.* 137, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.10.002>
- Eitzinger, J., Trnka, M., Hösch, J., Žalud, Z., Dubrovský, M., 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecol. Modell.* 171, 223–246. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.08.012>
- Ferreira, C.J.B., Zotarelli, L., Tormena, C.A., Rens, L.R., Rowland, D.L., 2017. Effects of water table management on least limiting water range and potato root growth. *Agric. Water Manag.* 186, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.02.020>
- Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., O’Connell, C., Ray, D.K., West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., Zaks, D.P.M., 2011. Solutions for a cultivated planet.

- Nature 478, 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Gathala, M.K., Ladha, J.K., Saharawat, Y.S., Kumar, V., Kumar, V., Sharma, P.K., 2011. Effect of Tillage and Crop Establishment Methods on Physical Properties of a Medium-Textured Soil under a Seven-Year Rice–Wheat Rotation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75, 1851. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0362>
- Genro Junior, S.A., Reinert, D.J., Reichert, J.M., 2004. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 28, 477–484. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300009>
- Grable, A.R., Siemer, E.G., 1968. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 32, 180–186.
- Gubiani, P.I., Goulart, R.Z., Reichert, J.M., José, D., 2013a. CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE MILHO ASSOCIADOS. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 37, 1502–1511.
- Gubiani, P.I., Goulart, R.Z., Reichert, J.M., Reinert, D.J., 2013b. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 37, 1502–1511.
- Guimarães Júnnyor, S., Severiano, C., Silva, G., Gonçalves, W.G., Andrade, R., Roberto, B., 2015. Comissão 3.3 - Manejo e conservação do solo e da água Sweet Sorghum Performance Affected by Soil Compaction and Sowing Time as a Second Crop in the Brazilian Cerrado. *Rev. Bras. Cienc. Do Solo* 39, 1744–1754. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20150121>
- Håkansson, I., Stenberg, M., Rydberg, T., 1998. Long-term experiments with different depths of mouldboard ploughing in Sweden. *Soil Tillage Res.* 46, 209–223. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00099-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00099-3)
- Hamza, M.A., Anderson, W.K., 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 82, 121–145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Huang, M., Liang, T., Wang, L., Zhou, C., 2015. Effects of no-tillage systems on soil physical properties and carbon sequestration under long-term wheat-maize double cropping system. *Catena* 128, 195–202. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.010>
- Jong van Lier, Q., 1997. The critical soil water content and its relation to soil water dynamics. *Sci. Agric.* 54, 45–50. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161997000300009>
- Klein, V.A., Camara, R.K., 2007. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 31, 221–227. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000200004>
- Kuncoro, P.H., Koga, K., Satta, N., Muto, Y., 2014. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices. *Soil Tillage Res.* 143, 180–187. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.008>
- Leao, T.P., da Silva, a P., 2004. A simplified Excel(R) algorithm for estimating the least limiting water range of soils. *Sci. Agric.* 61, 649–654. <https://doi.org/Doi.10.1590/S0103-90162004000600013>
- Letey, J., 1985. Relationship between soil physical properties and crop productions. *Adv. Soil Sci. Soil Sci.* 1, 277–294. <https://doi.org/10.1097/00010694-199005000-00010>
- Liane, C., Lima, R. De, Reinert, D.J., Reichert, J.M., 2010. Produtividade de culturas e resistência à penetração de Argissolo Vermelho sob diferentes manejos 89–98.

- <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000100012>
- Lima, V. M. P. Oliveira, G. C. de Serafim, M. E. Curi, N. Evangelista, A.R., 2012. Intervalo Hídrico Ótimo como Indicador de melhoria da Qualidade Estrutural de. *Rev. Bras. Ciência* 36, 71–78.
- Mentges, M.I., Reichert, J.M., Rodrigues, M.F., Awe, G.O., Mentges, L.R., 2016. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. *Geoderma* 263, 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.042>
- Mishra, A.K., Aggarwal, P., Bhattacharyya, R., Das, T.K., Sharma, A.R., Singh, R., 2015. Least limiting water range for two conservation agriculture cropping systems in India. *Soil Tillage Res.* 150, 43–56.
- Mohammadi, M.H., Asadzadeh, F., Vanclouster, M., 2010. Refining and unifying the upper limits of the least limiting water range using soil and plant properties. *Plant Soil* 334, 221–234. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0377-3>
- Moraes, M.T. de, Silva, V.R. Da, Zwirtes, A.L., Carlesso, R., 2014. Use of penetrometers in agriculture: a review. *Eng. Agrícola* 34, 179–193.
- Müller, M.M.L., Ceccon, G., Rosolem, C.A., 2001. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 25, 531–538. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000300002>
- Neto, J.F., Severiano, E. da C., de Pinho Costa, K.A., Guimaraes Junnyor, W.S., Goncalves, W.G., Andrade, R., 2015. Biological soil loosening by grasses from genus *Brachiaria* in crop-livestock integration. *Acta Sci.* 37, 375–383. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v37i3.19392>
- Nunes, M.R., Denardin, J.E., Pauletto, E.A., Faganello, A., Pinto, L.F.S., 2015. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. *Soil Tillage Res.* 148, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.007>
- Olibone, D., E, A.P., R, C.A., 2010. Least limiting water range and crop yields as affected by crop rotations and tillage. *Soil Use Manag.* 26, 485–493. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00301.x>
- Papadopoulos, A., Bird, N.R.A., Whitmore, A.P., Mooney, S.J., 2014. Does organic management lead to enhanced soil physical quality? *Geoderma* 213, 435–443. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.033>
- Pariz, C.M., Costa, C., Crusciol, C.A.C., Meirelles, P.R.L., Castilhos, A.M., Andreotti, M., Costa, N.R., Martello, J.M., Souza, D.M., Protes, V.M., Longhini, V.Z., Franzluebbbers, A.J., 2017. Production, nutrient cycling and soil compaction to grazing of grass companion cropping with corn and soybean. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 108, 35–54. <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9821-y>
- Pariz, C.M., Costa, C., Crusciol, C.A.C., Meirelles, P.R.L., Castilhos, A.M., Andreotti, M., Costa, N.R., Martello, J.M., Souza, D.M., Sarto, J.R.W., Franzluebbbers, A.J., 2016. Production and soil responses to intercropping of forage grasses with corn and soybean silage. *Agron. J.* 108, 2541–2553. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.02.0082>
- Pittelkow, C.M., Linquist, B.A., Lundy, M.E., Liang, X., van Groenigen, K.J., Lee, J., van Gestel, N., Six, J., Venterea, R.T., van Kessel, C., 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *F. Crop. Res.* 183, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.020>
- Pradhan, P., Fischer, G., Van Velthuizen, H., Reusser, D.E., Kropp, J.P., 2015. Closing yield gaps: How sustainable can we be? *PLoS One* 10, 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129487>

- Resende, Á., Silva, A., Borghi, E., Marques Gontijo Neto, M., Pitta, R., Ferreira, A., 2016. Tomada de Decisão Quanto a Adubação e Manejo de Nutrientes por Agricultores do Mato Grosso: Dados do Circuito Tecnológico 2015. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25169.53609>
- Safadoust, A., Feizee, P., Mahboubi, A.A., Gharabaghi, B., Mosaddeghi, M.R., Ahrens, B., 2014. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. *Agric. Water Manag.* 136, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.007>
- Savage, M.J., Ritchie, J.T., Bland, W.L., Dugas, W.A., 1996. Lower Limit of Soil Water Availability. *Agron. J.* 88, 644–651. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800040024x>
- Serafim, M.E., de Oliveira, G.C., Vitorino, A.C.T., Silva, B.M., Carducci, C.E., 2013. Qualidade Física E Intervalo Hídrico Ótimo Em Latossolo E Cambissolo, Cultivados Com Cafeeiro, Sob Manejo Conservacionista Do Solo. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 37, 733–742. <https://doi.org/10.1590/S0100-068320130003000020>
- Severiano, E. da C., Oliveira, G.C. De, Dias Junior, M.D.S., Costa, K.A. de P., Silva, F.G., Ferreira Filho, S.M., 2011. Structural changes in Latosols of the Cerrado region: I – Relationships between soil physical properties and least limiting. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 35, 773–782.
- Silva, A.P., Kay, B.D., 1996. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant Soil* 184, 323–329. <https://doi.org/10.1007/BF00010461>
- Silva, A.P., Kay, B.D., Perfect, E., 1994. Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1775–1781. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x>
- Silva, B.M., da Silva, E.A., de Oliveira, G.C., Ferreira, M.M., Serafim, M.E., 2014. Plant-Available Soil Water Capacity: Estimation Methods and Implications. *Rev. Bras. Cienc. Do Solo* 38, 464–475. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200011>
- Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., Silva, É.A., Ferreira, M.M., Norton, L.D., Curi, N., 2015. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. *Soil Tillage Res.* 154, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.013>
- Soane, B.D., Ball, B.C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., Roger-Estrade, J., 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil Tillage Res.* 118, 66–87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>
- STAFF., S.S., 1999. Soil taxonomy, Agriculture Handbook No. 436.
- Stone, L.F., Ferreira, E.P.D.B., Didonet, A.D., Heinemann, A.B., Oliveira, J.P. De, 2013. Correlação entre a produtividade do feijoeiro no sistema de produção orgânica e atributos do solo. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 17, 19–25. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000100003>
- Stone, L.F., Silveira, P.M., 2001. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 25, 395–401. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000100012>
- Tavares Filho, J., Barbosa, G.M.C., Guimarães, M.F., Fonseca, I.C.B., 2001. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um latossolo roxo. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 25, 725–730.
- Tormena, C.A., Araújo, M.A., Fidalski, J., Costa, J.M. Da, 2007. Variação temporal do

- intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 31, 211–219. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000200003>
- Tormena, C.A., Barbosa, M.C., Carlos, A., Gonçalves, C.A., 2002. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Scientia* 795–801.
- Tormena, C.A., Karlen, D.L., Logsdon, S., Cherubin, M.R., 2017. Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. *Soil Tillage Res.* 166, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.015>
- Tormena, C.A., Silva, A.P. Da, Libardi, P.L., 1999. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Tillage Res.* 52, 223–232. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00086-0)
- Trevisan, R.G., Freddi, O. da S., Wruck, F.J., Tavanti, R.R., Peres, F.S.C., 2017. Variabilidade de atributos físicos do solo e do arroz cultivado sob plantas de cobertura em sistema de integração lavoura-pecuária. *Bragantia* 76, 145–154. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.596>
- Verma, S., Sharma, P.K., 2008. Long-term effects of organics, fertilizers and cropping systems on soil physical productivity evaluated using a single value index (NLWR). *Soil Tillage Res.* 98, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.08.005>
- Williams, S.M., Weil, R.R., 2004. Crop Cover Root Channels May Alleviate Soil Compaction Effects on Soybean Crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 1403. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1403>

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos de IHO indicaram que os fatores físicos mais limitantes às culturas são RP e  $\theta^*$ , impondo restrições mesmo sob conteúdo de água alto no solo.

O IHO\* foi em geral menor do que o IHO, implicando em maior chance de que a umidade atual do solo durante os cultivos fique fora da faixa menos limitante.

Após a segunda safra já é possível verificar efeito negativo dos monocultivos sobre a qualidade física do solo, através da densidade máxima, reduzindo a capacidade do solo em disponibilizar água.

O uso de cultivo intercalar de braquiária, combinado com rotação de culturas em alto investimento (T5) destacou-se positivamente, reduzindo a ocorrência de valores extremos de densidades (densidade máxima), e aumentando o IHO e IHO\* em relação aos tratamentos com monocultivos.

A produtividade pouco se relacionou com os atributos físicos e químicos avaliados. Correlações entre produtividade e IHO ocorreram quando este foi calculado com a densidade máxima, sugerindo que o efeito dos manejos intensificados em reduzir situações extremas de densidades afetou a produtividade.

Os resultados apresentados nesse trabalho se mostraram importantes para regiões onde as condições climáticas não possibilitam mais de uma safra por ano agrícola, assim dificultando a formação de palhada. Uma vez que há indicativos de melhoria da qualidade física do solo com a intensificação de cultivos com apenas duas safras, essa modalidade de manejo se torna uma alternativa para minimizar os contratempos climáticos no estabelecimento do plantio direto na região do cerrado mineiro.