

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

André Gonçalves Panziera

INFLUÊNCIA DO RELEVO E DE DIFERENTES USOS SOB
ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS EM LATOSSOLO

Santa Maria, RS
2016

André Gonçalves Panziera

**INFLUÊNCIA DO RELEVO E DE DIFERENTES USOS SOB ATRIBUTOS FÍSICO-
HÍDRICOS EM LATOSSOLO**

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

Orientador: Professor Dr. Alexandre Swarowsky

Santa Maria, RS
2016

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

Gonçalves Panziera, André
Influência do Relevo e de Diferentes Usos Sob
Atributos Físico-hídricos em Latossolo / André Gonçalves
Panziera.- 2016.
95 p.; 30 cm

Orientador: Alexandre Swarowsky
Coorientador: Jean Paolo Gomes Minella
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2016

1. Conservação de Água no Solo 2. Formas de Relevo 3.
Sistemas de Manejo Agrícola 4. Atributos Físicos do Solo
I. Swarowsky, Alexandre II. Gomes Minella, Jean Paolo
III. Título.

©2016

Todos os direitos autorais reservados André Gonçalves Panziera. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho apenas poderá ser realizada mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Barão do Triunfo, 669, apartamento 802, Santa Maria, CEP 97010-070

Endereço Eletrônico: andrepanziera@hotmail.com

André Gonçalves Panziera

**INFLUÊNCIA DO RELEVO E DE DIFERENTES USOS SOB ATRIBUTOS FÍSICO-
HÍDRICOS EM LATOSSOLO**

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

Aprovado em 03 de outubro de 2016

Alexandre Swarowsky, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Afranio Almir Righes, Dr. (UNIFRA)

Jean Paolo Gomes Minella, Dr. (UFSM)

**Santa Maria, RS
2016**

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, Silvino Vicente Panziera, minha mãe, Nara Cristina Gonçalves, e minha irmã, Letícia Gonçalves Panziera, que ao longo de minha vida têm sido exemplos de luta para sempre buscar o melhor, bem como me deram toda a educação necessária para atingir este mérito.

AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho ocorreu, principalmente, pelo auxílio, compreensão e dedicação de várias pessoas. Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste estudo e, de maneira muito especial, agradeço:

- ao meu orientador Alexandre Swarowsky, pela oportunidade concedida, pela confiança em mim depositada, e pela pessoa humana, incentivadora e dedicada, grato pela orientação;

- à meu pai Silvino Vicente Panziera, minha mãe Nara Cristina Gonçalves e a minha irmã Letícia Gonçalves Panziera, por todo o amor verdadeiro e apoio em todos os momentos, porque sempre acreditaram na minha capacidade.

- à minha namorada, Nathalia Guarienti Prieto, pelo amor genuíno, carinho e compreensão nos momentos difíceis ao longo dessa jornada;

- aos meus grandes amigos João Francisco Piovezan Ramos, Fernando Silveira Moraes, Guilherme Pellegrini, Gabriel Bassotto Moreti, Ricardo Sartori Neves, pela ajuda prática e teórica na concretização deste trabalho;

Enfim, a todos aqueles que fazem parte da minha e que são essenciais para eu ser, a cada dia nessa longa caminhada, um ser humano melhor.

“Não sei como o mundo me vê, mas eu me sinto como um garoto brincando na praia, contente em achar aqui e ali, uma pedra mais lisa ou uma concha mais bonita, mas tendo sempre diante de mim, ainda por descobrir, o grande oceano de verdades.”

(Isaac Newton)

RESUMO

INFLUÊNCIA DO RELEVO E DE DIFERENTES USOS SOB ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICO EM LATOSSOLO

AUTOR: André Gonçalves Panziera
ORIENTADOR: Alexandre Swarowsky

O solo é um importante meio de suprimento de água para atender necessidade em sistemas de manejo agrícola. São suas propriedades físico-hídricas que o tornam capaz de regular a disponibilidade de água. Esse estudo avaliar como as formas de relevo e diferentes usos influenciam algumas propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho em uma encosta na região do Planalto do Rio Grande do Sul, e quais podem ser as implicações desses atributos na dinâmica de água no solo. Numa parte da área experimental com cultivo de ervais sem tráfego agrícola, e, em outra, com o sistema plantio direto, com rotação das culturas do trigo, soja e aveia, bem como, o uso de maquinário sobre o solo. Selecionou-se, 10 locais representativos da área de estudo como unidades experimentais. Nestas unidades experimentais, escavou-se uma trincheira de 0,9 m de profundidade, 1,5 m de comprimento e 1,0 m de largura. Delimitou-se três profundidades para cada unidade experimental, sendo estas 30, 60 e 90 cm. Em cada profundidade, coletou-se 5 amostras de solo com estrutura não deformada, sendo então 15 por unidade experimental e 150 em toda a área de estudo. Examinou-se morfologicamente todos os perfis para caracterizar a estrutura, consistência, cor, quantidade de raízes, tipo de poros, horizontes e manchas do solo. Realizaram-se análises físicas da densidade do solo, porosidade total, textura e condutividade hidráulica saturada. Gerou-se curvas de níveis da área, a partir de levantamento topográfico planialtimétrico. Em programa computacional, gerou setas preferenciais de escoamento superficial e intervalo de declividade. Caracterizou-se, para cada unidade experimental quanto as formas de vertentes. Constatou-se que, em geral, na área de estudo, a curvatura no perfil e no plano foram côncavas convergentes, respectivamente. Com base nessa informação, o fluxo da área tende a confluir a uma única região, com fluxos influenciados por declividade que varia de 1,83% a 20% na área como um todo. Na área de solo sob sistema plantio direto, em função da condutividade hidráulica saturada, foi constatado a diminuição do movimento vertical da água, quando esta alcança profundidades de 60 cm. A textura argilosa foi preponderante a 90 cm de profundidade, indicando distribuição do tamanho dos poros que conduzem tortuosidade dos caminhos preferenciais da água para armazenamento. Hidrologicamente, o Latossolo em estudo contém características físicas que implicam na geração de fluxo lateral sub-superficial. O padrão de escoamento é governado até 30 cm de profundidade pelas variações de ângulo e a posição da vertente, controlam a capacidade do solo de conduzir a água, infiltrar no perfil, e transportar sedimentos O elevado percentual de argila é o principal fator que governa a dinâmica de água em 60 e 90 cm, sendo atribuídos a natureza do solo.

Palavras-chave: Conservação de Água no Solo. Relevo. Atributos Físicos.

ABSTRACT

INFLUENCE OF TERRAIN AND DIFFERENT USES ON PHYSICAL AND HYDRICAL ATTRIBUTES IN LATOSOLO

AUTHOR: André Gonçalves Panziera

ADVISOR: Alexandre Swarowsky

Soil is an important means of supplying water to meet the need for agricultural management systems. It is its physical-water properties that make it capable of regulating the availability of water. This study evaluates how the relief forms and different uses influence some physical-water properties of a Red Latosol on a slope in the Rio Grande do Sul Plateau region, and what the implications of these attributes may be on soil water dynamics. In one part of the experimental area with herbaceous cultivation without agricultural traffic, and in another with the no-tillage system, with crops rotation of wheat, soybean and oat, as well as, the use of machinery on the soil. Ten representative sites of the study area were selected as experimental units. In these experimental units, a trench of 0.9 m depth, 1.5 m length and 1.0 m width was excavated. Three depths 30, 60 and 90 cm were delimited for each experimental unit. At each depth, 5 samples of soil with non-deformed structure were collected, being 15 per experimental unit and 150 throughout the study area. All profiles were morphologically examined to characterize the structure, consistency, color, amount of roots, pore type, horizons and soil spots. Physical analyzes of soil density, total porosity, texture and saturated hydraulic conductivity were performed. Levels contours were generated from a topographic planialtimetric survey. In the computational program, it generated preferential arrows of surface runoff and slope interval. It was characterized, for each experimental unit, the forms of slopes. It was found that, in general, in the study area, the curvature in the profile and plane were convergent concave, respectively. Based on this information, the flow of the area tends to converge to a single region, with flows influenced by declivity ranging from 1.83% to 20% in the area as a whole. In the area under no-tillage system, as a function of the saturated hydraulic conductivity, the vertical movement of the water, when it reached depths of 60 cm, was observed. The clay texture was preponderant to 90 cm depth, indicating distribution of the pore size that leads tortuosity of the preferred water paths for storage. Hydrologically, the Latosol under study contains physical characteristics that imply the generation of sub-superficial lateral flow. The flow pattern is governed up to 30 cm deep by angle variations and position of the slope, controlling the soil's ability to conduct water, infiltrate the profile, and transport sediments. The high percentage of clay is the main factor governing the Dynamics of water in 60 and 90 cm, be attributed to the nature of the soil.

Keywords: Water Conservation in Soil. Relief. Physical Attributes.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição morfológica em 30, 60 e 90 cm de profundidade de cada unidade experimental, em Latossolo Vermelho Distroférico Típico.	51
Tabela 2 - Fração areia das unidades experimentais da área de estudo.	90
Tabela 3 - Fração silte das unidades experimentais da área de estudo.	90
Tabela 4 - Fração argila das unidades experimentais da área de estudo.	91
Tabela 5 – Densidade do solo nas unidades experimentais da área de estudo.	91
Tabela 6 – Densidade de partículas nas unidades experimentais da área de estudo.	92
Tabela 7 - Porosidade total nas unidades experimentais da área de estudo.	93
Tabela 8 - Condutividade Hidráulica Saturada nas unidades experimentais da área de estudo.	93

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de curvatura horizontal e vertical, formas do terreno na paisagem.	29
Figura 2 - Localização da área experimental, em relação a micro-região e ao estado do Rio Grande do Sul.	33
Figura 3 - Representação temática da área experimental, com disposição das unidades experimentais para amostragem de solo e análise morfológica.	35
Figura 4 - Representação das isolinhas do relevo, setas de direção de escoamento e seções longitudinais e transversais na área experimental.	43
Figura 5 - Curvatura no perfil (seção longitudinal) e no plano (seção transversal) de cada unidade experimental da área de estudo.	45
Figura 6 - Fisionomia da área de ervais, composta de vegetação de grande e médio, e serrapilheira sobre o solo.	49
Figura 7 - Percentual médio da fração areia para cada profundidade estudada, no solo com cultivo de ervais e em sistema plantio direto sob rotação de culturas.	56
Figura 8 - Percentual médio da fração silte para cada profundidade estudada, no solo com cultivo de ervais e em sistema plantio direto sob rotação de culturas.	58
Figura 9 - Percentual médio da fração argila para cada profundidade estudada, no solo com cultivo de ervais e em sistema plantio direto sob rotação de culturas.	59
Figura 10 - Densidade média do solo em 30, 60 e 90 cm, nos dois sistemas de manejo estudados.	61
Figura 11 – Porosidade total do solo em 30, 60 e 90 cm, nos dois sistemas de manejo estudados.	64
Figura 12 – Condutividade hidráulica saturada em 30, 60 e 90 cm de profundidade, nos dois sistemas de manejo estudados.	66
Figura 13 - Condutividade hidráulica saturada do latossolo vermelho distroférico típico da área experimental, para a profundidade de 30 cm.	69
Figura 14 - Condutividade hidráulica saturada do latossolo vermelho distroférico típico da área experimental, para a profundidade de 60 cm.	70
Figura 15 - Condutividade hidráulica saturada do latossolo vermelho distroférico típico da área experimental, para a profundidade de 90 cm.	71

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO GERAL	14
3. JUSTIFICATIVA	14
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MORFOLÓGICAS DO SOLO	15
4.1.1 Textura do Solo	16
4.1.2 Densidade do Solo	17
4.1.3 Densidade de Partículas	18
4.1.4 Porosidade Total	18
4.1.4.1 Classes de Poros do Solo	19
4.1.5 Condutividade Hidráulica de Solo Saturado	21
4.1.6 Cor e Manchas do Solo	22
4.1.7 Estrutura do Solo	23
4.1.8 Consistência do Solo	23
4.1.9 Latossolos Vermelhos	24
4.1.10 Qualidade e Degradação Física do Solo	25
4.2 DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO	26
4.2.1 Balanço Hídrico	26
4.2.4 Infiltração e Armazenamento de Água no Solo	26
4.3 FORMAS DE VERTENTES NO RELEVO E SUA INFLUÊNCIA NA DINÂMICA DE ÁGUA	27
4.4 SISTEMAS DE MANEJO AGRÍCOLA	30
5. MATERIAL E MÉTODOS	32
5.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	32
5.2 AMOSTRAGEM E EXAME MORFOLÓGICO DAS UNIDADES EXPERIMENTAIS	35
5.3 ANÁLISE FÍSICA DO SOLO EM LABORATÓRIO	36
5.3.1 Condutividade Hidráulica Saturada	37
5.3.2 Densidade do Solo e Porosidade Total	37
5.3.3 Textura do Solo	39
5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	40
5.5 ESPACIALIZAÇÃO DAS CURVAS DE NÍVEIS, PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E CORTES NAS UNIDADES EXPERIMENTAIS	41
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
6.1 RELEVO	42
6.1.1 Formas de Vertentes das Unidades Experimentais	45
6.2 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS.....	50
6.2.1 Cor Úmido e Manchas do Solo.....	52
6.2.2 Estrutura e Consistência	53
6.2.3 Raízes e Tipologia Porosa	53
6.2.4 Distinções Morfológicas nas Unidades Experimentais	55
6.3 TEXTURA DO SOLO	55
6.4 DENSIDADE DO SOLO	60
6.5 POROSIDADE TOTAL DO SOLO.....	63
6.6 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM SOLO SATURADO	65
6.6.1 Espacialização da Condutividade Hidráulica Saturada	68
7. CONCLUSÃO	72
REFERÊNCIAS	73

ANEXO A – DADOS DA FRAÇÃO AREIA.....	90
ANEXO B – DADOS DA FRAÇÃO SILTE.....	90
ANEXO C – DADOS DA FRAÇÃO ARGILA.....	91
ANEXO D – DADOS DE DENSIDADE DO SOLO.....	91
ANEXO E – DADOS DE DENSIDADE DE PARTÍCULAS	92
ANEXO F – DADOS DE POROSIDADE TOTAL.....	93
ANEXO G – DADOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA.....	93

1. INTRODUÇÃO

A água é utilizada em grande quantidade em agroecossistemas. Esse recurso hídrico é armazenado dentro do solo, sendo este responsável pela regulação e suprimento de água à biota e culturas. Cada sistema de manejo agrícola utiliza técnicas, equipamentos e condições de paisagem diferentes, modificando a capacidade natural do solo de armazenar e distribuir água. Por exemplo, solos tendem a reservar menos água devido a compactação pelo tráfego agrícola, pisoteio animal e acidentes geográficos (BERGAMIN et al., 2010; MÜLLER et al., 2001; RIGHES et al., 2002a; SECCO et al., 2004; VIZZOTO; MARCHEZAN; SEGABINAZZI, 2000).

Muitos estudos voltados a quantificar a hidrologia de solos sob sistemas de manejo agrícola levam apenas em consideração a camada superficial (GENRO JUNIOR et al., 2009). Os diferentes manejos do solo podem gerar mudanças físicas em profundidades maiores, chegando até 1 m, criando zonas de compactação ao longo do perfil do solo (ORTIGARA et al., 2014). Sendo assim, esses estudos limitam o padrão de representações da paisagem, porque assumem o subsolo como meio homogêneo e neutro, que distribui água e soluto uniformemente pelos poros. Ainda, desconsideram fatores de formação básico, com as formas de relevo. Em função disso, observam-se lacunas acerca do conhecimento sobre controle hídrico, que poderiam ser úteis em períodos de estiagem, e para incorporação da hidrologia do solo em técnicas de agriculturas de precisão.

O papel que o solo exerce no controle do suprimento hídrico é fundamental, e ocorre por meio de dinâmica de água, que varia em função de suas propriedades (SWAROWSKY, 2010). Entender como ocorre a dinâmica de água no solo, baseando-se em suas propriedades físicas e morfológicas em maiores profundidades é importante, porque os modelos amplamente utilizados dependem do cômputo dessas informações, como SWAT, PEARL e SESOIL (PISTOCCHI; BOURAQUI; BITTELLI, 2008). Além disso, tem-se evidenciado que a redistribuição interna da água no solo, em relação ao relevo e em escala de microbacia hidrográfica, é fortemente influenciada pela variabilidade de suas propriedades físico-hídricas (BATHKE; CASSEL, 1991; McDANIEL et al., 1992; McDANIEL et al., 2001; McDANIEL; FALEN, 1994; SWAROWSKY et al., 2012).

Se a variação de atributos físico-hídricos do solo fosse analisada partindo das formas do relevo e de solos passíveis de manejos agrícola diferentes, em até 90 cm

de profundidade, pode-se aproximar-se do entendimento do papel do solo na dinâmica de água subsuperficial, e estender tais implicações hidrológicas em escala de microbacia hidrográfica. Em função disso, pode-se aprimorar a calibração ou até mesmo atingir a validação de estudos hidrológicos dentro do perfil do solo. Logo, a compreensão das propriedades físicas do solo, e as implicações na dinâmica de água, pode implicar num controle maior do suprimento hídrico para a agricultura.

2. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse estudo foi avaliar como as formas de relevo e diferentes usos influenciam algumas propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho em uma encosta na região do Planalto do Rio Grande do Sul, e quais podem ser as implicações desses atributos na dinâmica de água no solo.

3. JUSTIFICATIVA

Latossolos são amplamente existentes na região do Planalto do Rio Grande do Sul. São historicamente conhecidos pela sua aptidão à agricultura. Sua paisagem é diversificada, com intensa produção agrícola intercalada com áreas naturais inalteradas, como mata nativa, árvores frutíferas, muita serrapilheira e locais com formas de relevo bastante diferentes. Nessas áreas naturais não ocorre tráfego de máquinas agrícola, diferentemente das áreas de produção, cujo sistema de manejo é o plantio direto que usa maquinários pesados atuando sobre o solo durante o ano, com irrigação por aspersão.

Conseqüentemente, é possível entender o papel das propriedades físico-hídricas do solo no suprimento de água para a biota e cultivares. Em escala de microbacia hidrográfica, por exemplo, esse estudo pode indicar os motivos de deficiência água; aprimorar sistemas de manejo agrícola; e modelagem avançada dos recursos hídricos para conservação de água e solo em nível de bacia hidrográfica. Portanto, justifica-se a realização deste estudo, porque a compreensão detalhada do efeito das formas de relevo e do uso nas propriedades físico-hídricas do solo em profundidade implica no avanço do controle hídrico agrícola.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica do presente trabalho foi dividida em quatro capítulos. No primeiro capítulo, foram desenvolvidos fundamentos sobre características físicas e morfológicas do solo, e suas implicações para o movimento e armazenamento de água em sub-superfície. No segundo capítulo, as características físicas do solo foram integradas numa revisão sobre a dinâmica de água do solo e em escala de bacia hidrográfica. O terceiro capítulo buscou sustentar como o relevo influencia no movimento de água do solo. O último capítulo de revisão tratou sobre conceito de diferentes sistemas de manejo agrícola, atribuindo também no contexto, as causas de uso e as consequências sobre o solo.

4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MORFOLÓGICAS DO SOLO

O solo é trifásico e heterogêneo, com espaços porosos, partículas minerais e orgânicas (BRAGA et al., 2005). Nos poros do solo são armazenados água e ar, e onde ocorrem todos os processos de suprimento para as plantas, bem como, as trocas gasosas do sistema radicular (KEMPER; CHEPIL, 1965; KLEIN, 2014).

A compreensão e a quantificação do impacto do manejo sobre a qualidade física do solo são fundamentais para a evolução de sistemas agrícolas sustentáveis (DEXTER; YOUNGS, 1992). Exemplos de qualidade física inferior do solo para o movimento de água é baixa capacidade de infiltração de água, escoamento superficial, sistema radicular reduzido; e solos com boa qualidade física assumem condição oposta ao exposto (ANDRADE; STONE, 2009). Quantificando a densidade, porosidade e permeabilidade do solo em latossolo vermelho distroférico, Moreira et al. (2012) observaram perda de qualidade física do solo em sistema de integração lavoura-pecuária, implicando na diminuição da produtividade de grãos e desenvolvimento da pastagem, especialmente sob condições climáticas adversas.

Mesmo com a existência de vários problemas que vão contra as funções ideais do solo, todos eles possuem a estrutura do solo degradada característica em comum (DEXTER, 2004a). Para a clara visualização sobre a resposta dos atributos do solo ao impacto de diferentes sistemas de manejo e da produtividade agrícola, é peculiarmente relevante entender a variabilidade espacial do solo (MION et al., 2012; OVALLES; REY, 1994; SOUZA et al., 2001).

4.1.1 Textura do Solo

A textura do solo representa a proporção e distribuição das partículas de areia, silte e argila no solo (LEMOS; SANTOS, 1984). As partículas de argila possuem diâmetro menor que 0,002 mm, grande área superficial específica, implicando em alta retenção de água, fluxo hídrico lento e alta coesão; as partículas de silte contêm diâmetro entre 0,002 e 0,05 mm, retém menos água que a argila e exercem mais drenagem em relação a mesma; e a fração areia possui partículas de 0,05 a 2,0 mm, com muita permeabilidade, mas retenção desprezível de água (CORÁ et al., 2009; MARCOLIN; KLEIN, 2011). Pela diversificação da proporção desses materiais em cada solo, a textura pode influenciar a infiltração de água, armazenamento, aeração, na facilidade de mecanização, e na aderência ou força de coesão das partículas do solo (FERRARESI et al., 2012; RIGHES; SILVA, 2009).

A fração argila é o elemento que mais recebe atenção, por possuir natureza coloidal, cargas negativas e maior superfície específica em relação às demais, o que a confere como a fração do solo que mais influencia o seu comportamento físico (KLEIN, 2014; REICHARDT; TIMM, 2004). A elevada área superficial específica das partículas de argila atua com preponderância no contato entre as partículas sólidas e a água, podendo regular tanto a velocidade e a lateralidade do movimento hídrico, quanto a força de retenção de água (FORYSTHE, 1975; KLEIN et al., 2009; REICHARDT, 1987). Klein et al. (2010) quantificaram a influência da textura na retenção de água na condição de ponto de murcha permanente (PMP), concluindo que 91% da variação do conteúdo de água no PMP está relacionada a variação do percentual de argila do solo.

A textura do solo demora muitos anos para se alterar, pois é inerente ao solo, e frequentemente designa o valor econômico do campo (KLEIN, 2009). Mesmo assim, em determinadas regiões é possível a existência de elevada variabilidade da distribuição de areia, silte e argila. No solo, essa distribuição é heterogênea devido a formação do solo, ocasionando em pequena amplitude de espaço, interferências na produtividade das culturas (MANN et al., 2010; ZUCOLOTO et al., 2011). Estudando a variabilidade textural em área irrigada por pivô central em diferentes posições da paisagem, Castione et al. (2015) concluíram que a migração de argila para camadas

subsuperficiais do solo é relacionada com a gênese do solo e ao carreamento de partículas pela água.

Para determinar a composição de areia, silte e argila, realiza-se a análise granulométrica. Um dos métodos é o do hidrômetro, descrito por Bouyoucos (1962). Este método determina os percentuais das frações areia, silte e argila usada para definir a textura. O princípio físico baseia-se na velocidade de sedimentação das partículas em um sólido em um fluido sem gradiente de temperatura (RANZANI, 1959). Pela metodologia ser simples e de baixo custo, pode-se realizar muitas análises por dia (KLEIN, 2014).

4.1.2 Densidade do Solo

A variação de densidade é grande em solos agrícolas, principalmente em função de suas características mineralógicas, textura, matéria orgânica (MARCOLIN; KLEIN, 2011). Ainda assim, em função da produtividade sobre os solos agrícola, busca-se quantificar por meio da densidade, a compactação crítica que o solo pode suportar no manejo (DE MARIA; CASTRO; DIAS, 1999; STONE; SILVEIRA, 2001).

Camargo e Alleoni (1997), em estudo sobre a relação entre compactação do solo e o crescimento de plantas, consideram a densidade crítica para solos franco-argilosos e argilosos o valor de $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$, isto é, valor máximo de compactação que diminui a capacidade produtiva. Torres e Saraiva (1999) observaram densidade de 1,0 a $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos argilosos, e 1,25 a $1,70 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos arenosos, em estudo sobre camadas de impedimento do solo para uso de sistemas agrícola com a soja. A maior densidade em solos agrícolas está associada à compactação do solo pelo tráfego de máquinas e implementos (HAJABBASI et al., 1997; HARTEMINK, 1998; CAVENAGE et al., 1999), como também pela menor estabilidade da estrutura do solo (HORN et al., 1995).

Pesquisas buscam identificar a compactação do solo a partir da densidade para melhor produção agrícola, entretanto, não se observa na literatura, consonância entre valores máximos de densidade que indiquem a compactação em latossolos. Moreira et al. (2012), quantificando densidade do solo em sistema de integração lavoura-pecuária, obtiveram diferenças significativas nesse atributo entre as profundidades de 7, 14 e 21 cm. Estes autores atribuíram tais resultados a frequente secagem e umedecimento nessas profundidades, como também ao revolvimento pelos

mecanismos de abertura de sulcos durante a semeadura das culturas de verão e à maior concentração das raízes do azevém nessa camada. Embora observe-se que a máxima compactação do solo é superficial, entre 0 e 30 cm, o tráfego agrícola tende a modificar propriedades físicas do solo na sub-superfície, como 30 a 60 cm (MOREIRA et al., 2012; RAGHAVAN; ALVO; MCKYES, 1990).

Para amostragem de solo na horizontal, utiliza-se nestes cilindros o amostrador do tipo Uhland (UHLAND, 1949). O método objetiva remover amostras de solo indeformadas com o mínimo de perturbação em relação a sua estrutura original (HARTGE; ELLIES, 1999). Um dos motivos pelos quais o método proposto por Uhland (1949) é mais utilizado, advém de sua facilidade de alocação laboratorial dos anéis cilíndricos com solo na estufa, retirando-os depois de secos, quando se tem um grande número destes. Isso facilita muito a operação em laboratório, posterior a coleta em campo.

4.1.3 Densidade de Partículas

A densidade de partículas é definida como sendo a relação entre a massa seca de solo e o volume ocupado pelas suas partículas sólidas (BLAKE, 1986). Informações de densidade de partícula permitem indicar a composição mineralógica do solo, calcular a sua velocidade de sedimentação, e determinar indiretamente a sua porosidade (KLEIN, 2014). Os principais constituintes minerais do solo são quartzo, feldspato e silicatos de alumínio coloidais, sendo por essa razão que se considera, para efeitos de cálculos, o valor médio de densidade de partículas de $2,65 \text{ T m}^{-3}$ (BATISTA; PAIVA; MARCOLINO, 2014). Partículas em suspensão são passíveis à ação de sua massa e, predominantemente, à ação da velocidade da corrente na direção horizontal, enquanto as partículas finas, têm distribuição aproximadamente uniforme na vertical (CARVALHO, 1994). Para Latossolos Vermelhos, a densidade de partículas possui valores próximos à $2,82 \text{ Mg m}^{-3}$ (BEUTLER et al., 2005).

4.1.4 Porosidade Total

A porosidade do solo é o espaço onde ocorrem os processos dinâmicos do ar e da solução do solo (HILLEL, 1970). Este atributo físico origina-se do arranjo aleatório das partículas sólidas do solo. Teoricamente, considera-se que todas as partículas do

solo sejam esféricas, assumindo-se que o volume de espaço poroso é sempre 50% (KLEIN, 2014). O solo ideal para finalidade agrícola deve ter porosidade total de $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, com distribuição de 34% para macroporos e 66% para microporos (KIEHL, 1979). Entretanto, áreas sob cultivo apresentaram menores valores de porosidade total e de macroporosidade comparado com o solo de mata nativa, segundo Araújo et al. (2004), em trabalho sobre avaliação da qualidade física de um latossolo vermelho distrófico com e sem uso e ocupação.

O impacto de diferentes manejos agrícola também tem sido quantificado pela porosidade total, tamanho e continuidade dos poros (BEUTLER et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2001; SERVADIO et al., 2001). Isso é importante, porque existe relação estreita entre o desenvolvimento do sistema radicular de plantas e a porosidade do solo (HATANO et al., 1998).

Estudando impacto nos atributos físicos de uma latossolo vermelho sob sistema de integração lavoura-pecuária, Moreira et al. (2012) citam que máquinas e animais traduzem-se em modificações na macroporosidade do solo, responsável pelo processo de drenagem. As alterações citadas pelos referidos autores implicam em mudanças na porosidade total, pois a mesma integra a macroporosidade. Avaliando propriedades físicas em diferentes usos do solo, para caracterizar a compactação, Ortigara et al., (2014) constataram macroporosidade de $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na mata nativa, a $0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, no pastejo rotacionado, atribuindo a grande variação ao pisoteio animal intensivo em área de pastagem, que causou alterações na estrutura do solo.

O estudo da porosidade total é a metodologia indicada para caracterizar como que a água pode fluir dentro do perfil do solo (GONÇALVES; LIBARDI, 2013; GUERIF, 1987). Isso porque, a forma, a distribuição e a continuidade dos poros condiciona o comportamento físico-hídrico (RIGHES; SILVA, 2009). Como o solo tem afinidade com o líquido, e os sólidos originam os poros, o efeito de compactação pode mitigar o fluxo de água pelos poros, pois os mesmos reduzem de tamanho e aleatoriamente podem tornar-se descontínuos (LUXMOORE, 1981).

4.1.4.1 Classes de Poros do Solo

Além do arranjo aleatório das partículas minerais, o espaço poroso do solo também é formado por vários processos físicos e biológicos. A observação da morfologia do solo, na forma natural, permite a visualização da sua estrutura e o tipo

de espaço poroso, que é importante para compreensão sobre como as práticas de manejo afetam a qualidade física do solo (MERMUT; GREVERS; DE JONG, 1992).

Existem classes diferentes de poros no solo. Nos poros estruturais integram-se as fissuras e os empacotamentos, por apresentarem unidade estrutural do solo (RINGROSE-VOASE, 1987). Enquanto o empacotamento de poros do solo decorre da forte interconexão dos agregados, com geometria irregular forma tubular, as fissuras são formadas pelas contrações do solo, resultando em rachaduras (GONÇALVES, 2011). A análise de poros estruturais permite expressar o estado de compactação do solo (RICHARD et al., 2001).

Os poros texturais do solo originam-se do arranjo das partículas elementares do solo, sendo intra-agregados e muito pequenos (DEXTER et al., 2008a). Esta classe de poros está associada a maior retenção de água e disponibilidade às plantas (BARROS et al., 2016). Em Latossolos Vermelho Distrófico, é muito frequente da classe de poros texturais (CARDUCCI, 2010).

Bioporos são poros provenientes da atividade biológica, como animais invertebrados ou sistema radicular, isto é, fauna e flora, contendo formato de canais mais ou menos cilíndricos, dos quais podem se ramificar, sendo assim chamados de dendríticos ou câmaras (CASTRO, 2008; RINGROSE-VOASE 1991; SCHOENEGER et al., 1998). Abreu (2000) afirma que poros originados da ação de raízes são mais estáveis, pois microrganismos realizam a decomposição destas, produzindo elementos cimentantes nas paredes dos poros, proporcionando maior durabilidade, se comparados àqueles formados por implementos mecânicos.

Investigações sobre bioporos é relevante, porque a diminuição destes reduz da condutividade hidráulica saturada e perda de produção agrícola do solo (CURMI et al., 1994; VANDENBYGAART et al., 1999). Quantificando alterações na porosidade biológica do solo em latossolo vermelho-amarelo submetido ao tráfego agrícola, Lima et al., (2005) constataram redução de bioporos, conforme a aproximação da linha de cultivo, com a mata nativa apresentado maiores valores de porosidade total.

Em pesquisa sobre degradação da estrutura e das propriedades hidráulicas de solos cultivados no Brasil, Curmi et al. (1994) observaram que os poros texturais não foram passíveis de compactação; os poros estruturais reduzem de tamanho e mudam de forma; e o bioporos desaparecem, quando submetidos a processos de compactação. Avaliando a resistência de penetração em latossolo vermelho distrófico típico, sob diferentes sistemas de culturas, na região de Ijuí, RS, Genro

Júnior, Reinert e Reichert (2004) observaram que, após o término do ciclo das cultivares, as raízes decompostas formaram os bioporos. Ainda, tais autores afirmam que, embora o volume de bioporos seja inferior ao volume total de poros, estes são muito funcionais e mitigam a resistência do solo, principalmente por originar macroporos.

4.1.5 Condutividade Hidráulica de Solo Saturado

A condutividade hidráulica é a medida básica do fluxo de água no solo (ILEK; KUCZA, 2014), fundamental à produção para o meio agrícola. Esse parâmetro expressa a facilidade e a intensidade de deslocamento da água ao longo do perfil do solo (MARQUES et al., 2008; KLEIN, 2014). No estudo da dinâmica de água dentro do perfil solo é muito importante entender como a densidade de fluxo atua. O fluxo interno de água depende da comunicação e tamanho dos espaços porosos, dos quais podem oferecer resistência ao movimento hídrico (LIBARDI, 2005).

A primeira equação para determinar o movimento de água no solo foi descrita por Henry Darcy. Nessa equação, ficou estabelecido que a quantidade de água que passa por unidade de tempo e de área pelo meio poroso saturado é proporcional ao gradiente de potencial total da água nesse meio (GONÇALVES; LIBARDI, 2013).

O parâmetro K descreve o efeito da distribuição do tamanho e forma das partículas, a tortuosidade e continuidade dos poros do solo, conferindo o padrão de fluxo no perfil de solo (GHIBERTO, 2009). O conteúdo de água no solo é máximo quando a condutividade é determinada em solo saturado, sendo por esse motivo que a mesma é representada por K_0 (KLEIN, 2014).

Geralmente, na determinação da condutividade hidráulica de solo saturado por método direto, isto é, em laboratório, utiliza-se o permeâmetro de carga constante (RIGHES, 2009). Esse método utiliza amostras com estrutura preservada, coletadas em anéis cilíndricos volumétricos, que são penetrados no solo pelo extrator de Uhland. Como a própria denominação de K_0 indica, as amostras não deformadas devem estar saturadas, ou seja, com todos os poros preenchidos por água (ILEK; KUCZA, 2014). Com amostra de solo em estado saturado, e anéis cilíndricos com dimensões conhecidas, coleta-se em um recipiente o volume de água que passa pelo permeâmetro de carga constante por tempo determinado e carga hidráulica constante.

4.1.6 Cor e Manchas do Solo

A cor é uma característica morfológica determinada em torrões de cada horizonte do solo, segundo Munsell (2009). Com a cor do solo, é possível determinar qualitativamente e de modo imediato, a presença de minerais constituintes da argila, a gleização e o regimes hídricos internos do perfil do solo (BATISTA; PAIVA; MARCOLINO, 2014).

Os padrões de cor são úteis para predizer as regiões onde ocorre a saturação hídrica do solo (VEPRASKAS; LINDBO; SKAGGS, 2003). São as tonalidades pouco cromada e ou acinzentada as principais indicadoras de saturação no solo (DANIELS et al., 1971; BOUMA, 1983; PICKERING; VENEMAN, 1984). Normalmente, observam-se tais condições em solos de várzea, pois ficam encharcados um longo período de tempo, ou seja, frequentemente sob estado de saturação. Solos acinzentados também ocorrem em áreas com menos de 10 gramas de ferro por quilograma de solo, e severas deficiências de minerais e de estabilidade de estrutura (DUARTE et al., 2000; SCHOENEBERGER et al., 1998).

Latosolos Vermelhos normalmente apresentam o inverso das características supracitadas. Com codificações entre 2,5R, 5R ou 10R 3/6 conforme Munsell (1905), com aspecto brilhoso, indicam forte presença de óxidos de ferro não-hidratados, hematita ou ferri-hidrita no solo (SANTANA et al., 2013). A cor avermelhada é indicadora de recuperação de matéria orgânica dentro do perfil do solo.

Uma das características morfológicas mais marcantes nos solos bem drenados é a variação da cor em profundidade (DUARTE et al., 2000). Essa manifestação de ocorre meio de manchas do solo. Considera-se pouco frequente manchas no perfil do solo quando a quantidade for inferior a 2% da área exposta; frequência média quando ocorrer manchas entre 2 a 20% da área exposta; e acima 20% considera-se muito frequente (SCHOENEBERGER et al., 1998). A pouca frequência de manchas no solo é indicativo de pouca mobilização de ferro ou pouca flutuação do lençol freático, dificilmente saturando-o (CAMPOS et al., 2003). Solos com média ou alta frequência indicam depleção de argila, isto é, ocorrem pequenos núcleos no perfil do solo onde perde-se pigmentação, distinguindo da matriz em geral, indicando redução da quantidade de ferro, manganês ou argila (SCHOENEBERGER et al., 1998).

4.1.7 Estrutura do Solo

A estrutura do solo é um atributo morfológico definido como o agregado de partículas em unidades estruturais compostas (BATISTA; PAIVA; MARCOLINO, 2014). As estruturas naturalmente formadas nos processos pedogenéticos são: a) granulares, que são pequenos poliedros curvados e com faces irregulares; b) blocos angulares, que são poliedros com faces que intercepta em ângulos agudos; c) blocos subangulares, ou seja, poliedros sub-arredondados com faces planas sem ângulos agudos; d) laminar, sendo unidades tabular e plana; e) prismática: Agregados alongados verticalmente (SCHOENEGER et al., 1998).

A importância da estrutura do solo reflete-se no desenvolvimento de plantas, infiltração de água na quantidade de ar disponível para trocas gasosas do sistema radicular e atividade biológica, tanto de macro, quanto microrganismos (KLEIN, 2014). Solos com estrutura granular tendem a apresentar brusca perda de água (MIGUEL; TEIXEIRA; PADILHA, 2006). É perceptível visualmente este tipo de estrutura em Latossolos Vermelhos, que é a classificação de solo mais presente na região noroeste do estado Rio Grande do Sul. Em função da mineralogia da fração argila e da estrutura granular, é possível a existência de solos com grande volume de poros grandes (diâmetro ≥ 10 mm) e de poros extremamente pequenos (diâmetro ≤ 1 mm), não mostrando significativo volume de poros intermediários, o que faz com que neles a disponibilidade de água para as plantas seja baixa (CARDUCCI et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2004).

4.1.8 Consistência do Solo

Consistência é o grau de coesão e adesão que o solo exibe, bem como a resistência deste a deformação ou ruptura, sendo fortemente influenciado pela relação solo-água (SCHOENEGER et al., 1998). Ao passo que a consistência do solo seco varia de solta até extremamente dura, o solo úmido tem possui o estado de consistência denominado de friabilidade, podendo variar de solta até extremamente firme (LEMOS; SANTOS, 1996). A friabilidade indica a tendência da desconstrução dos agregados do solo para dimensões menores, em função da aplicação cargas (WATTS; DEXTAR, 1998). Muito disso ocorre em razão de zonas de falhas na estrutura do solo (DEXTER; WATTS, 2000).

A friabilidade é o estado que produtores rurais normalmente utilizam para preparar o solo, em função de seu fraco efeito cimentante enquanto úmido, haja vista que quando seco, o mesmo tende a ser endurecido, dificultando o trabalho do maquinário agrícola. A friabilidade dos agregados representa qualidade estrutural e física do solo, pois a condição de solo friável é melhor para a germinação das sementes, o crescimento das plântulas e o estabelecimento das culturas (BAVOSO et al., 2010). Por tais fatos, esse é o estado de consistência do solo mais estudado. Acima do estado friável é o estado plástico do solo, que, operacionalmente não são recomendados, haja vista a maior adesão do solo às ferramentas de preparo e de semeadura (ASHBURNER; SIMS, 1984).

O melhor estado friável do solo úmido ocorre melhor quando existe equilíbrio entre frações texturais de argila e areia, pois quando muito argiloso é coeso e firme, porém pegajoso e plástico, dificultando o trabalho mecânico; quando muito arenoso, é friável, com coesão frágil, porém de fácil preparo mecânico. Observa-se solos argilosos bem estruturados na região do Planalto Rio Grande do Sul, onde a mineralogia indica presença predominante de argilomineral 1:1, imprimindo ao solo ampla faixa de friabilidade, facilitando o manejo. (REINERT; REICHERT, 2006). Contudo, a friabilidade não é capaz de distinguir sistemas de manejo e de preparo do solo, conforme conclusão obtida por Bavoso et al. (2010), em estudo sobre efeito da friabilidade e resistência tênsil em área de produção, silagem e pastejo.

4.1.9 Latossolos Vermelhos

Os latossolos em geral são homogêneos em relação a cor, textura e estrutura. São solos profundos, frequentemente com mais de 2 metros de profundidade, com grande horizonte B latossólico. A intemperização intensa dos constituintes minerais resulta na maior concentração relativa de argilo-minerais resistentes, como óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (BATISTA; PAIVA; MARCOLINO, 2014). Em latossolo vermelho, é predominante os hidróxidos de ferro (OLIVEIRA et al., 2004). São de textura variável, de média a muito argilosa, porosos, macios e permeáveis, apresentando pequena diferença no percentual de argila em profundidade e, comumente, são de baixa fertilidade natural.

Schwabe (1987) e Diemer et al. (2008), pesquisando as propriedades e formação do solo na região de Ijuí, respectivamente, constataram os seguintes

padrões nos Latossolos: horizonte A espesso, variando de 30 a 60 cm aproximadamente, de coloração avermelhada escura, argiloso com mais de 60% de argila, horizonte B muito espesso, atingindo mais de 200 cm, de coloração vermelha escura, mais de 75% de argila, pouco estruturado, poroso; e horizonte C a mais de 200 cm de profundidade, espesso e composto por basalto intemperizado, possuindo maior percentual de silte. Latossolos sob vegetação nativa apresentam distribuição dos minerais com padrão aglutinado, em agregados granulares muito pequenos (diâmetro < 3 mm), conferindo elevado índice de vazios, ordenado em cavidades interconectadas (VOLLANT-TUDURI et al., 2005; SEVERIANO, 2010).

4.1.10 Qualidade e Degradação Física do Solo

Discussões sobre qualidade do solo iniciaram em 1990, a partir da abordagem científica acerca da preocupação com a degradação dos recursos naturais, sustentabilidade agrícola e o papel do solo nessa conjuntura (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). A degradação do solo ocorre pela perda de matéria orgânica, compactação e erosão, podendo esta última ser eólica, hídrica ou antropogênica (BLAINSKI et al., 2008). O processo de degradação pode ser facilmente perceptível por meio da visualização da estrutura do solo, como pela formação de voçorocas por exemplo (FARIA; FRANCO, 1994). Dentre os principais fatores que podem influenciar na degradação do solo estão o escoamento superficial, topografia do terreno, cobertura e natureza do solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2005).

A qualidade do solo é a capacidade deste de exercer funções na natureza, como meio de crescimento e ancoragem de raízes e culturas, regulação e compartimentalização do suprimento e fluxo de água, e servir como atenuador de compostos prejudiciais ao ambiente (DORAN, 1997). As inter-relações das propriedades físicas controlam processos naturais do solo, e conseqüentemente sua qualidade, constituindo-se como importante instrumento para auxiliar na conservação ambiental de ecossistemas (CARNEIRO et al., 2009; CARDOSO et al., 2011).

Para a compreensão da qualidade física do solo, Doran e Parkin (1994) propuseram os seguintes atributos como sendo indicadores de qualidade: (a) textura; (b) profundidade de solo e raízes; (c) densidade do solo; (d) infiltração de água do solo; (e) capacidade de armazenamento e retenção de água; e (f) conteúdo de água no solo. Para Ingaramo (2003), as principais propriedades e fatores físicos são:

porosidade, distribuição do tamanho de poros, densidade do solo, resistência mecânica, condutividade hidráulica, distribuição de tamanhos de partículas e profundidade em que as raízes crescem.

4.2 DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO

A dinâmica da água no solo é entendida como sendo o movimento hídrico no solo, determinado tanto pela infiltração, quanto pela condutividade hidráulica saturada. Essa dinâmica integra também armazenagem, retenção e disponibilidade de água para plantas (GONÇALVES, 2011).

Nos próximos subcapítulos, serão contextualizados elementos que compõem a dinâmica de água, como também quais são os sistemas aos quais ela está integrada. Dentre estes citam-se a bacia hidrográfica, ciclo hidrológico, balanço hídrico, infiltração e armazenamento de água no solo.

4.2.1 Balanço Hídrico

A quantidade de água dentro da bacia hidrográfica é diretamente proporcional às entradas de água e inversamente proporcional às saídas da mesma. As entradas de água são decorrentes principalmente da precipitação pluvial. Já pela ação da evaporação, infiltração profunda e vazão da rede de drenagem advêm a saída de água da unidade hidrográfica. Seguindo o raciocínio lógico, caso a saída for maior que a entrada, é possível haver diminuição do volume de água. Caso contrário, a tendência é o aumento no nível da água de rios e lagos (BURIOL, 2009).

Basicamente, o balanço hídrico pode ser descrito quantitativamente pela aplicação do princípio da conservação de massa, para determinado volume de controle. A taxa de variação de massa armazenada, isto é, a disponibilidade de água, é igual a subtração entre a taxas de entrada e de saída (GOLDENFUM, 2001). Neste sentido, a quantidade de água armazenada no solo é o fator mais importantes no balanço hídrico da bacia hidrográfica (SWAROWSKY et al., 2010).

4.2.2 Infiltração e Armazenamento de Água no Solo

A infiltração é a introdução de água através da superfície no solo (ALVARENGA et al., 2011). A quantidade de água que atravessa uma unidade de área da superfície do solo por unidade de tempo é denominada taxa de infiltração (LIBARDI, 2005). O gradiente mátrico e o espaço poroso do solo são, simultaneamente, os fatores iniciais que condicionam a entrada de água no solo (GONÇALVES, 2011). Gradativamente, a taxa de infiltração diminui, atingindo estado constante, dependendo somente dos macroporos, pois o solo saturou, e esta é a infiltração básica, ou seja, a quantidade máxima de água que o solo pode conduzir (HILLEL, 1973). Nesse momento a taxa de infiltração é aproximadamente a condutividade hidráulica saturada (JULIÀ et al., 2004).

Estudo sobre efeito da drenagem subsuperficial no balanço de água em solos mal drenados sob cultivo de arroz, Darzi-Naftchali et al. (2013) afirmaram que parte significativa do total de água aplicada em campo foi perdida para vazão não produtiva. Nesse sentido, a capacidade de infiltração do solo associada à presença de macroporos e inclinação do relevo, pode fazer o movimento subsuperficial de água um mecanismo dominante de vazão (ALI et al., 2014; FIORI, 2012; McDONELL, 1990; SIDLE et al., 2000).

O armazenamento de água no solo sob baixos potenciais matriciais é decorrente do processo de capilaridade, sendo, portanto, fortemente alterada pelo arranjo das partículas do solo, devido à presença de poros estruturais, que são poros inter-agregados (RAWLS et al., 1991). Na capilaridade a retenção ocorre nos microporos dos agregados, e está sempre associada a uma interface curva ar-água dependente do tamanho do poro (GONÇALVES, 2011). Por outro lado, com o secamento do solo, a composição granulométrica e mineralógica assume maior importância, o que se deve à maior superfície específica para a adsorção das moléculas de água (GUPTA; LARSON, 1979; MACHADO et al., 2008).

4.3 FORMAS DE VERTENTES NO RELEVO E SUA INFLUÊNCIA NA DINÂMICA DE ÁGUA

O fluxo de água é considerado o componente-chave na erosão do solo e transporte de nutrientes em campos agricultáveis (ALI et al., 2014). As alterações topográficas do relevo podem esclarecer a ocorrência de variabilidade espacial das propriedades físicas do solo, pois condicionam o movimento e transporte de água, que

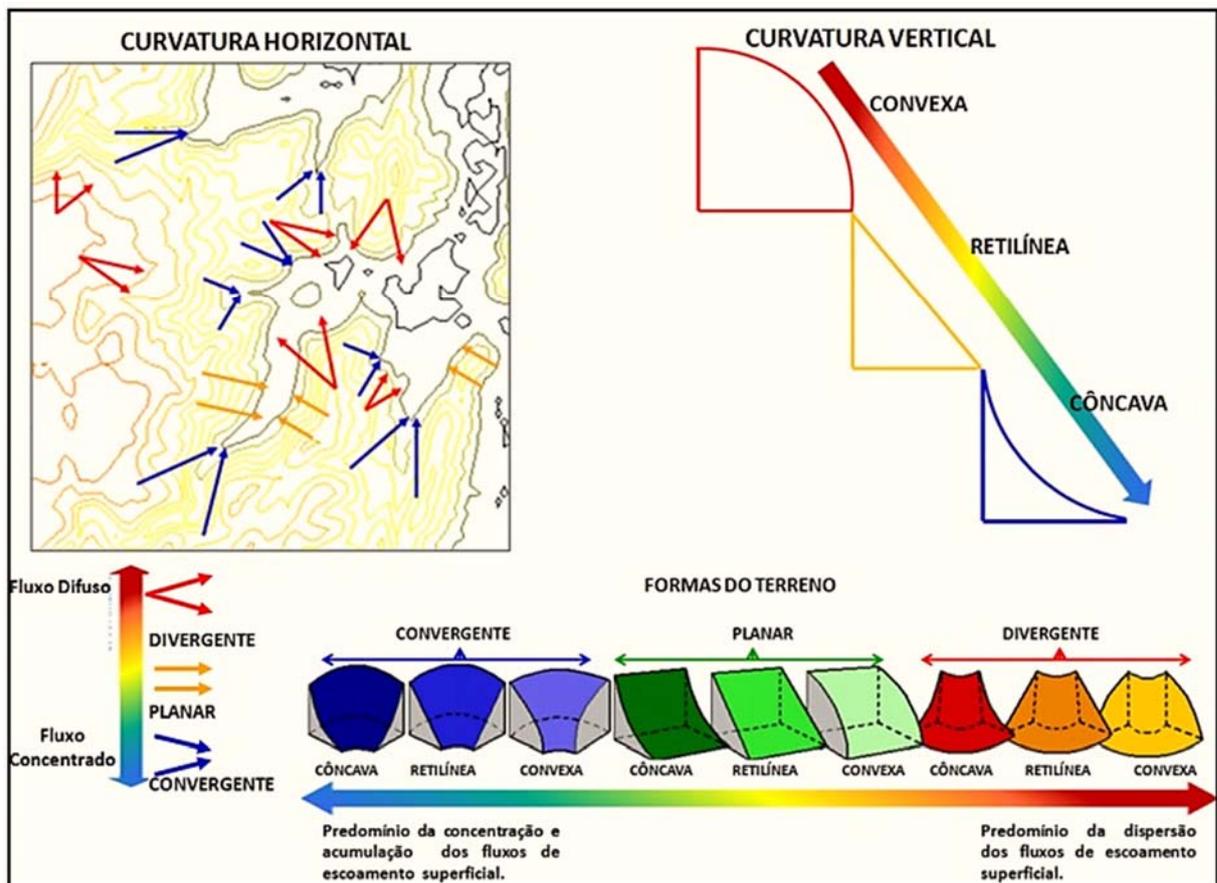
é o agente que carrega as partículas minerais (CASTIANE et al., 2015; SANCHES et al., 2009; SILVA JUNIOR et al., 2012).

A paisagem é composta de elementos da encosta, que respondem particularmente ao efeito local do intemperismo, escorregamento e erosão (BLOOM, 1970). As vertentes são elementos da superfície terrestre com inclinação em relação a horizontal, com orientação no espaço, sendo esses locais onde se inicia o intemperismo, o transporte e deposição de materiais (VELOSO, 2002). Assim, avaliando a inclinação, que é expressa por ângulo ou gradiente, pode-se classificar as vertentes em retilíneas, quando segmentos ou partes das vertentes apresenta ângulo constante e, em curvas, quando apresentam ângulo variável (SOPCHAKI; SAMPAIO, 2013).

Com os ângulos das formas de vertente, pode-se classifica-las conforme sua curvatura no plano e no perfil, atributos que compõem os índices topográficos primário (MINELLA; MERTEN, 2012). Relevos côncavos favorecem a confluência de água, configurando caminhos preferenciais de aceleração ou desaceleração do fluxo da água sobre o mesmo. Os relevos convexos tendem a espalhar a água de modo divergente, não gerando caminhos preferenciais de fluxo de água. Por último, os lineares manifestam fluxo superficial em linha reta, não tendendo para os lados; e as planícies causam menos fluxo, mais de infiltração ou de alagamentos (BEVEN; KIRBY, 1979; BRAGA et al., 2005).

A curvatura no perfil varia em relação a declividade na direção de sua orientação podendo ser côncava ou convexa; a curvatura no plano varia em relação a declividade na direção ortogonal à da orientação da vertente podendo divergir ou convergir no relevo (Figura 1). Terrenos convergentes são aqueles em que as direções de maior declividade em diferentes pontos do terreno tendem a convergir, terrenos divergentes são aqueles em que as direções de maior declividade em diferentes pontos tendem a divergir (MOORE et al., 1988).

Figura 1 - Tipos de curvatura horizontal e vertical, formas do terreno na paisagem.



Fonte: (VALERIANO, M. M. 2008a).

As diferentes formas de vertentes influenciam o escoamento da água em diferentes trajetórias, sendo essencial o seu entendimento para estudar a variabilidade de atributos do solo (SOUZA et al., 2003). Isso porque as formas do relevo, por exercerem influência no fluxo de água, energia e distribuição de material nas vertentes (SIRTOLI, 2008). Fluxos difusos ou concentrados são governados pela declividade do relevo em conjunto com a sua forma. A declividade é considerada um dos atributos topográficos primários que controlam processos essenciais à formação do solo, como também afetam o conteúdo de água no solo, potencial de erosão e deposição (GALLANT; WILSON, 2000; SIRTOLI et al., 2008). Contudo, quando as irregularidades da superfície do solo contêm dimensões de ordem menor que a sequência da vertente, tem-se as micro-topografias (YONG, 1972). Tais feições são frequentes em solos pouco desenvolvidos ou degradados pela atividade agrícola, manifestando-se principalmente por meio de micro-depressões (SOLE-BENET et al., 1997).

O comportamento dos fluxos d'água foram estudados por Leão et al. (2010), concluindo que a concavidade do relevo condicionou o movimento confluyente de partículas do solo, ao passo que a convexidade do relevo inverteu a mobilização da massa do solo paralelamente ao sentido da vertente. Os gradientes do relevo influenciam na distribuição das frações granulométricas argila, areia e silte (LEÃO et al., 2011). Em estudo sobre influência do relevo na erosão de Latossolo Vermelho, Souza et al. (2003), concluíram que nem o relevo côncavo nem o linear proporcionou variações na erosão a partir propriedades do solo.

Dependendo da sua heterogeneidade com gradientes locais, o relevo pode causar diferenças espaciais e temporais na distribuição de energia, água e das propriedades do solo (FU; RICH, 1999; SIRTOLI et al., 2008). Conjuntamente a variação do relevo, textura e o nível de saturação do solo, é possível a ocorrência de fluxos laterais subsuperficiais (HELFER, 2006). Abaixo da superfície do relevo, naturalmente geram-se canais dos quais o fluxo de água preferencialmente escoar (SWAROWSKY, 2010). Para quantificar estes fluxos, pode-se mensurar o balanço de massa, ou seja, contabilizando os fluxos positivos, como águas pluviais, e o fluxos negativos, que incluem interceptações vegetais, evapotranspiração e as características físicas intrínsecas do solo (RENNÓ, 2003).

4.4 SISTEMAS DE MANEJO AGRÍCOLA

Cada sistema de manejo agrícola fundamenta-se numa série de operações com a finalidade de desenvolver culturas e conservar o solo. No sistema convencional de cultivo, o solo é preparado por meio de grades pesadas ou arado, complementada, quando necessário, com subsolagem e escarificador para fragmentar os impedimentos físicos e descompactar o solo (FREITAS, 1992). Esse sistema de manejo tem sido gradativamente menos utilizado, em função de seus impactos nas propriedades físicas do solo. Verificando os impactos causados pelo manejo convencional em Latossolo Vermelho-Amarelo, Cunha et al. (2001) concluíram que este sistema provocou restrições nas propriedades edáficas estudadas no terceiro ano de uso consecutivo, influenciando favoravelmente a densidade do solo e a disponibilidade de água para plantas.

A prática agrícola mais difundida atualmente é o sistema plantio direto. Esse sistema de cultivo não revolve solo, exceto nos sulcos de semeadura, e mantém este

coberto permanentemente com culturas ou palha, preservando a qualidade ambiental por meio da manutenção dos resíduos culturais na superfície (EMBRAPA, 2003; MUZILLI, 1991). Em muitas regiões, utiliza-se o sistema plantio direto sob rotação de culturas (VIEIRA, 2009). Fisicamente, solos após quatro anos sob sistema plantio direto, apresentam maior densidade e microporosidade na superfície, e menor macroporosidade e porosidade total, na comparação com o manejo convencional (RICHART, 2005).

O efeito de sistemas de manejo agrícola na qualidade física do solo depende da umidade atual, consistência friável, pressão de contato e profundidade de trabalho (ALVES; SUZUKI; 2004; RICHART et al., 2005). A qualidade de implementação de sistemas de manejo agrícola é muito estudada a partir da densidade, porque a principal causa da perturbação de solos agrícolas e a perda de produtividade tem sido a compactação (RICHART, et al., 2005). Dependendo do sistema de manejo agrícola, a compactação causada no solo pode reduzir até 60% do crescimento radicular de plantas (BENGOUGH; MULLINS, 1991; IJIMA et al., 1992; PANAYITOPOULOS; PAPADOPOULOU; HATJIIOANNIDOU, 1994).

No Brasil, muitos estudos avaliaram mudanças nas propriedades dos solos, comparando sistemas de manejo agrícola com solo de mata como referência ou sem o uso de maquinário (ARAÚJO et al., 1998; BORGES et al., 1999 DIAS JUNIOR; ESTANISLAU, 1999; SANCHES et al., 1999; SILVA; RIBEIRO, 1992). O solo sob vegetação nativa contém características físicas apropriadas ao desenvolvimento regular das plantas (ANDREOLA; COSTA; OLSZEWSKI, 2000). Isso porque, cada sistema de manejo contém sua intensidade de preparo, espessura de camada mobilizada, histórico de uso, pressões exercidas e a quantidade de passadas dos equipamentos em cada safra (GENRO JUNIOR et al., 2009; SECCO et al., 2004), diferindo-se muito de solos com mata nativa ou sem tráfego agrícola.

A compressão do solo oriunda do manejo agrícola gera incremento do potencial mátrico, diminuindo a macroporosidade e elevando a porosidade de retenção hídrica, pela transformação desta em microporos (CARDUCCI et al., 2011; OLIVEIRA; SEVERIANO; MELLO, 2007). Isto acontece pelo arranjo natural do solo não mobilizado, e pela pressão exercida pelo tráfego de máquinas agrícolas, principalmente quando feito em solos argilosos e com muita umidade (SILVEIRA; STONE, 2003). Contudo, salienta-se que apesar das pressões, tais limitações ocorrem abaixo da camada de 0 a 0,03m, pois na camada mais superficiais ocorre

mobilização do solo, especialmente nas operações de semeadura e adubação em linha, que aumenta a porosidade e reduz a densidade do solo (GENRO JUNIOR et al., 2009).

5. MATERIAL E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos nesse trabalho elaborou-se a sequência de etapas segregadas nas seguintes atividades:

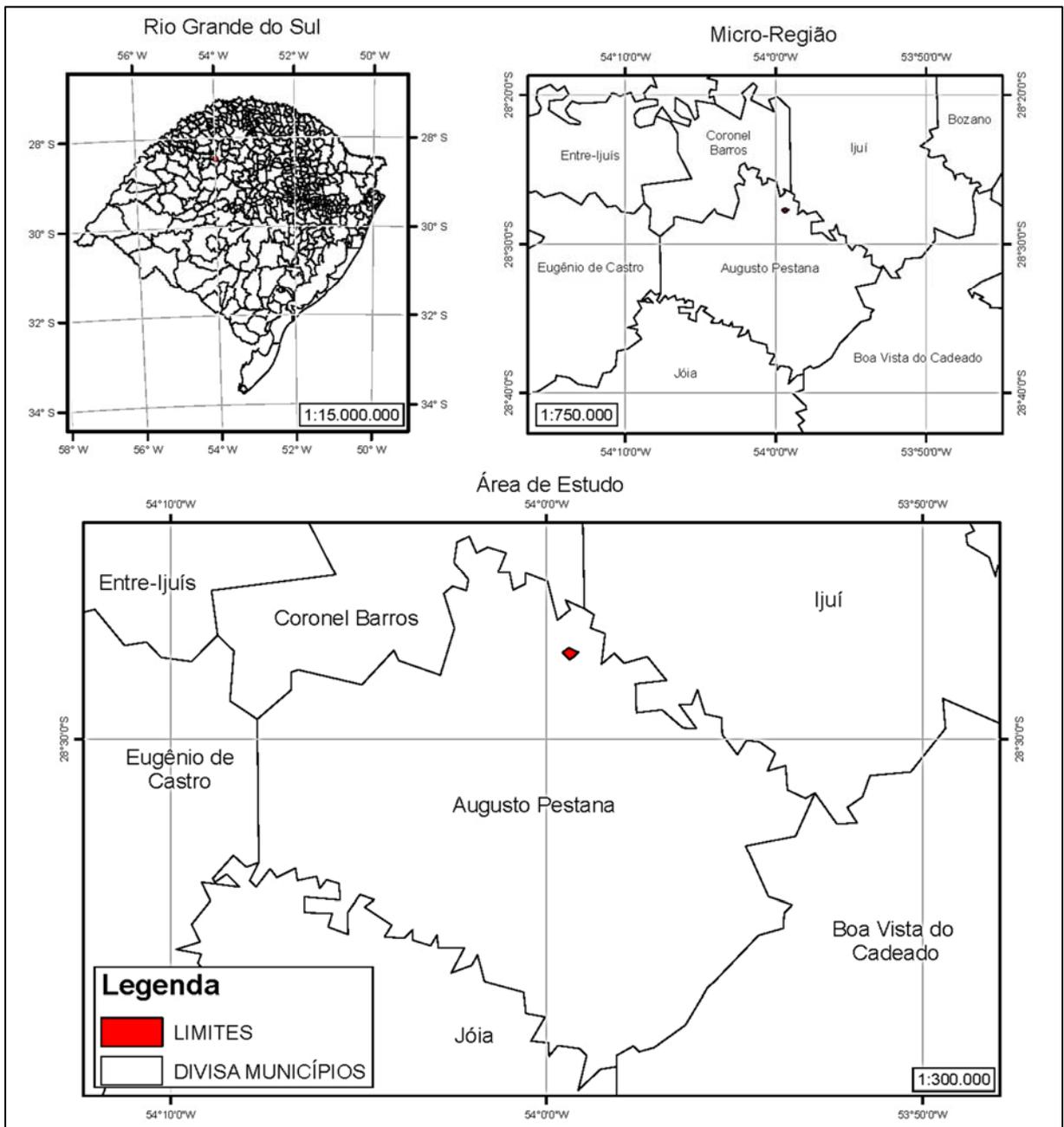
- a. Levantamento planialtimétrico georreferenciado da área experimental, para gerar as curvas de nível do relevo.
- b. Utilização das curvas de níveis para gerar intervalos de declividade, setas de escoamento, cortes longitudinais e transversais sobre as unidades experimentais, para analisar as tendências topográficas ao escoamento superficial e influência das formas de vertente;
- c. Geração de mapa temático, para determinar os limites de cada sistema de manejo dentro da área experimental;
- d. Seleção de unidades experimentais de amostragem de solo, para a melhor representatividade das propriedades físicas de estudo.
- e. Análise da morfologia do solo a campo, por meio visual e manuseio, para tornar perceptível as características de cada unidade.
- f. Coleta de amostras com estrutura não deformadas de solo, seguidas de determinação laboratorial dos seus atributos físicos, dos quais possam interferir na dinâmica de água;
- g. Análise estatística e espacialização dos atributos físicos do solo.

5.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

A área experimental localiza-se na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, dentro dos limites do município de Augusto Pestana, RS. A área é uma parte da microbacia hidrográfica do rio Conceição, tributário do rio Ijuí. As coordenadas geográficas da região de estudo são de 28°27'34,19" até 28°27'53,15" de latitude Sul e 53°59'09,60" até 53°59'34,79" de longitude Oeste (Figura 2). Essa área foi escolhida pela ampla representatividade ambiental observada visualmente. A área contém dois

sistemas de manejo agrícola, que permitiram realizar as comparações necessárias para o presente estudo, para a mesma classificação de solo.

Figura 2 - Localização da área experimental, em relação a micro-região e ao estado do Rio Grande do Sul.



Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

O clima da microbacia hidrográfica do rio Conceição é mesotérmico brando superúmido sem estação seca, com média de 1.600 mm ano⁻¹ de precipitação pluvial

e homogeneidade de chuvas temporal e espacialmente (BELTRAME, 2000; CHEVALLIER, 1991; GENRO JUNIOR et al., 2009; NIMER, 1989; PEREIRA; KOBIYAMA; CASTRO, 2014). Conforme Koppën, a macrorregião onde está inserida a área experimental é classificada como cfa, descrita por temperaturas média das máximas superior à 22 °C e a média das mínimas entre 8 °C com verão quente.

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico Típico (EMBRAPA, 2006; GENRO JUNIOR et al., 2009). Esse é um tipo de solo profundo, com elevada quantidade de óxido de ferro, aspectos originados de basalto, textura argilosa e mineralogia gibbsítica (ARAÚJO-JUNIOR et al., 2011). O uso do solo na microbacia hidrográfica do rio Conceição é essencialmente agrícola, sendo a soja, milho, trigo, aveia, carne e leite os principais produtos obtidos. Na área experimental existem dois sistemas de manejo diferentes. O primeiro sistema de cultivo é de erva-mate (*Ilex Paraguariensis*), cujo solo não é passível do uso maquinário agrícola. Até onde se sabe, este solo tem sido utilizado para esta finalidade. Na outra fração da área experimental, o sistema de manejo é o plantio direto sob rotação de culturas, que são a soja (*Glycine max*), aveia (*Avena Sativa*) e o trigo (*Triticum*).

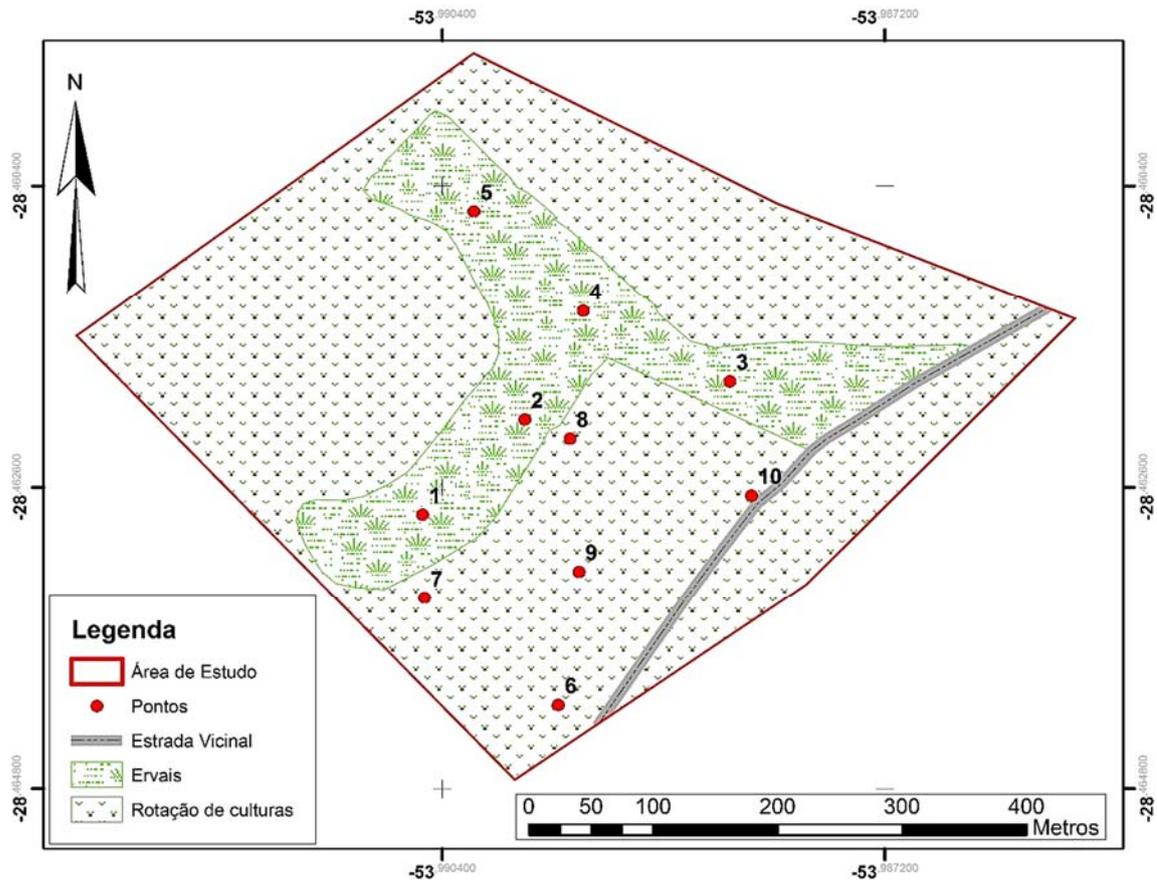
A heterogeneidade do relevo foi caracterizada por meio de levantamento topográfico planialtimétrico da área experimental. O aparelho utilizado foi uma estação total *Sanding STS 752*, com precisão de 2 polegadas. O método de levantamento foi o de irradiação, conforme o recomendado pela NBR 13133 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

Ainda, com o aparelho estação total, implantou-se e materializou-se pontos de apoio no terreno, determinando suas coordenadas topográficas. Com estes, geraram-se as isolinhas do relevo, isto é, linhas que unem pontos de mesma altitude, com representação dos acidente e declividade do terreno. A partir disso, foi gerada representação temática da área, necessária à definição das unidades experimentais dentro da área de estudo.

Selecionou-se dez unidades experimentais na área de estudo. Para cada sistema de manejo, foram estabelecidas cinco unidades experimentais. Foram considerados os seguintes critérios, de modo hierárquico, para a escolha do local das unidades experimentais: A) máxima cobertura espacial da área experimental; B) tipo de cobertura do solo; C) topografia do terreno. Tais unidades experimentais foram localadas durante o levantamento topográfico planialtimétrico. As coordenadas

geográficas foram importadas junto ao modelo de desnível, gerado pela malha de pontos de apoio topográfico, dos quais foram representados no mapa temático (Figura 3).

Figura 3 - Representação temática da área experimental, com disposição das unidades experimentais para amostragem de solo e análise morfológica.



Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

5.2 AMOSTRAGEM E EXAME MORFOLÓGICO DAS UNIDADES EXPERIMENTAIS

Para cada uma das unidades experimentais, escavou-se trincheira de 0,9 m de profundidade, 1,0 m de largura e 1,5 m de comprimento. Delimitou-se três níveis de profundidade, sendo estas 30, 60 e 90 cm. Em cada uma das três profundidades definidas, para cada uma das dez unidades experimentais, coletou-se cinco amostras com estrutura não deformada de solo, em cilindros de Uhland com dimensões de 6,9 cm de diâmetro e 7 cm de altura. Ao longo da área experimental foram coletadas 150 amostras de solo.

As amostras foram coletadas na horizontal, após a trincheira estar totalmente aberto. Utilizou-se nesse tipo de coleta o dispositivo denominado castelo (KLEIN, 2014), que foi impactado com o uso de um martelo para direcionar e penetrar o cilindro no perfil de solo. Buscou-se o melhor ângulo de 90° possível em relação ao perfil de solo, visando a melhor horizontalidade de coleta. As amostras na horizontal foram coletadas na mesma seção transversal, no lado do perfil correspondente às cotas visualmente maiores do relevo. Cada amostra foi identificada e envolvida em papel filme para o transporte até o laboratório.

No final de cada processo de amostragem, analisou-se morfologicamente cada unidade experimental, de modo visualmente e por meio de manuseio do solo. Para isso, utilizou-se os métodos, padrões e codificações propostos por Schoeneberger et al. (1998). Sendo assim, conforme o referido autor, durante a análise morfológica, foram considerados os seguintes aspectos: A) Horizonte, indicando a nomenclatura conforme a textura visível; B) Transição, podendo esta ser muito abrupta, abrupta, clara, gradual ou difusa; C) Topografia, se era plano, suavemente irregular ou com fortes ondulações; D) Cor, conforme o livro de cores de Munsell; E) Quantidade de manchas, podendo ser pouco, comum ou muito expressivo; F) Tamanho das manchas, sendo fina, média, grosseira, muito grosseira ou extremamente grosseira; G) Estrutura, podendo ser granular, blocos angular ou sub-angulares; H) Grau da estrutura, podendo ser de fraca, moderada a forte; I) Tamanho da estrutura, indicando se é de muito fina até extremamente grosseira; J) Consistência, se é friável, muito friável, firme, rígida; K) Frequências de raízes; e L) Tipos de poros, com auxílio de lupa.

5.3 ANÁLISE FÍSICA DO SOLO EM LABORATÓRIO

Na análise das propriedades físicas do solo, foram consideradas as amostras de solo coletadas na horizontal, em 30, 60 e 90 cm de profundidade, após aberta cada trincheira. Com as 150 amostras coletadas na horizontal, determinou-se, condutividade hidráulica saturada, densidade, porosidade total e textura do solo. Com os dados obtidos, gerou-se as espacializações dos atributos físicos da área experimental.

5.3.1 Condutividade Hidráulica Saturada

As amostras devidamente identificadas e envolvidas com papel filme foram raspadas, removendo o excesso de solo sobre os extremos dos anéis volumétricos. As mesmas foram limpas e novamente identificadas. Na parte inferior de cada cilindro foi usado tecido geotêxtil para impedir a perda de solo. Após, as amostras foram submetidas a saturação por capilaridade, por meio de lâmina de água de 1 cm, por 24 horas. Depois de período de tempo, elevou-se a lâmina de água para 6 cm, mantendo as amostras durante mais 24 horas que antecederam as determinações.

Com as amostras de solo completamente saturadas, cuidadosamente acoplou-se estas a estrutura do permeâmetro de carga constante. Teve-se muito cuidado na parte de vedação, utilizando-se fita isolante entre o cilindro com a amostra de solo saturado e o sobre cilindro. Manteve-se por 24 horas o fluxo de água, para que os caminhos preferenciais de água no solo dos anéis fossem delineados e a condutividade hidráulica fosse constante. Passados o período de 24 horas, período do qual a vazão tornou-se praticamente estável, colocaram-se recipientes graduados abaixo do funil de cada cilindro. Anotou-se o volume percolado por 1 hora e interrompeu-se o fluxo após esse tempo para cada amostra. Por fim, utilizou-se a equação abaixo para determinar a condutividade hidráulica saturada, conforme equação 1:

$$K_o = Q \cdot L / A \cdot H \cdot t \quad (1)$$

em que:

K_o : Condutividade hidráulica saturada (mm h^{-1});

Q : Volume percolado (mm^3);

L : Altura da amostra (mm);

A : Área do cilindro (mm^2);

H : Carga hidráulica (mm);

t : Tempo (h);

5.3.2 Densidade do Solo e Porosidade Total

Após a determinação da condutividade hidráulica, as amostras foram secas em estufa, onde permaneceram por 48 horas a 105°C, até obter massa constante, determinando-se a massa de solo seca. A densidade do solo (D_s) obteve-se pelo quociente entre a massa de solo seco (M_s) à 105 °C e o volume total (V_t) do solo ao natural, conforme equação 2:

$$D_s = M_s / V_t \quad (2)$$

em que:

D_s : Densidade do solo (g cm^{-3});

M_s : Massa seca do solo em estufa à 105°C (g);

V_t : Volume total (cm^3);

Determinou-se a densidade de partículas (D_p) de cada uma das amostras de solo. Para isso, utilizou-se o método do balão volumétrico (Embrapa, 2011). A partir disso, a densidade de partículas foi determinada por meio da equação 3:

$$D_p = M_s / V_s \quad (3)$$

em que:

D_p = Densidade de partículas (g cm^{-3});

M_s = Massa de solo seco em estufa a 105°C (g cm^{-3});

V_s = Volume de sólidos do solo (cm^3);

Com os dados de densidade do solo e de partículas, avançou-se na obtenção da porosidade total (P_t) do solo. Conforme Klein (2014), para a porosidade total realizou-se a diferença entre a unidade e o resultado do quociente entre D_s e D_p , conforme equação 4

$$P_t = 1 - (D_s / D_p) \quad (4)$$

em que:

P_t : Porosidade total do solo ($m^3 m^{-3}$);
 D_s : Densidade do solo ($Mg m^{-3}$);
 D_p : Densidade de partículas ($Mg m^{-3}$);

5.3.3 Textura do Solo

O método utilizado para determinar a textura do solo, foi o do hidrômetro (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2011; BOUYOUCOS, 1962), em virtude de seu grande número de análise num mesmo dia e baixo custo. Cada amostra, após seca em estufa para determinação da densidade, foi destorroada e passada em peneira de 0,053 mm. Utilizou-se 40 g de solo, que foram destorroados, peneirados e colocados num copo de Becker, adicionando-se 20 mL de Hidróxido de Sódio 1 Normal (NaOH 1N); 80 mL de água destilada, e mantendo sob repouso por 15 minutos. Após, transferiu-se a amostra para o agitador Hamilton Beach, onde completou-se até 2/3 da capacidade deste com água destilada, agitando-se a amostra a 12.000 rpm por 10 minutos.

Cessada a agitação, colocou-se a amostra numa proveta de 500 mL, completou seu volume com água destilada. Após 40 segundos, foi imediatamente mergulhado o hidrômetro de Bouyoucos para efetuar a primeira leitura da densidade de suspensão para determinação do silte e argila, uma vez que a areia já estava sedimentada depois do pequeno período de repouso (KLEIN, 2014). Duas horas depois, foi efetuada a segunda leitura da densidade de suspensão, pois o silte já está sedimentado após esse tempo (BOUYOUCOS, 1962), restando apenas argila.

Como o hidrômetro de Bouyoucos é calibrado para a temperatura de 68°F (20°C), e, sendo assim foram efetuadas correções para as leituras efetuadas. Para cada grau superior ou inferior a 20°C, acrescentou-se ou subtraiu-se, respectivamente, 0,36 graduações de cada leitura efetuada com o hidrômetro. As equações para determinar as frações do solo foram as seguintes:

$$\text{Percentual de argila (\%)} = (2^\circ \text{ leitura} \cdot 2,5) \cdot f \quad (5)$$

$$\text{Percentual de silte (\%)} = (1^\circ \text{ leitura} - 2^\circ \text{ leitura}) \cdot 2,5 \cdot f \quad (6)$$

$$\text{Percentual de areia (\%)} = 100 - (1^\circ \text{ leitura} \cdot 2,5 \cdot f) \quad (7)$$

em que f é o fator de correção empregado nos resultados das análises para Terra Fina Seca em Estufa (TFSE), sendo o quociente entre a massa de solo úmida e massa de solo seca.

Pela soma das frações não ser 100%, redistribuiu-se o erro das análises adotando a metodologia proposta por Ruiz (2005). O método deste autor consiste em redistribuir o erro de forma proporcional ao tamanho da fração, por meio do uso das seguintes equações:

$$K = 100 / \text{soma das frações (argila + silte + areia) obtida} \quad (8)$$

$$\text{Fração corrigida} = \text{Fração obtida} \cdot K \quad (9)$$

em que K é o Fator de ajuste para as frações granulométricas.

Realizados os ajustes, tabelou-se os dados e buscou-se enquadrar as texturas grupamento textural específico. Para isso, utilizou-se o triângulo para classificação das classes texturais do solo adaptado da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo por Lemos e Santos (1984).

5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Para entender os efeitos dos parâmetros físicos, foram realizadas análise estatísticas das propriedades em relação aos dois tipos de manejo de solo. Inicialmente foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov, para verificar a normalidade dos dados. Não existindo a necessidade de transformação de dados, realizou-se o teste de Tukey, a 5% de probabilidade, para a comparação múltipla de médias. Para o teste, considerou-se dois sistemas de manejo com três profundidades em cada, e cinco repetições para cada atributo físico analisado. As propriedades físicas foram densidade, porosidade total, textura e condutividade hidráulica saturada. Utilizou-se, como recurso computacional estatístico, o *software* Sisvar 6.0 (FERREIRA, 2011).

5.5 ESPACIALIZAÇÃO DAS CURVAS DE NÍVEIS, PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E CORTES NAS UNIDADES EXPERIMENTAIS

Um total de 70 pontos de apoio foram levantados na área experimental para gerar as curvas de níveis do relevo. Para a geração das curvas de níveis do terreno, o levantamento foi georreferenciado e os pontos foram amarrados ao sistema de coordenadas SIRGAS 2000. O programa computacional utilizado para execução dos procedimentos foi o *AutoCad Civil 3D*. Das curvas de níveis do terreno foram extraídos os intervalos de declividade do terreno. Foi realizada interpolação dos pontos de apoio do terreno, determinando o centroide triangular para então gerar as setas de escoamento superficial preferencial.

A curvatura no perfil e no plano de cada unidade experimental foi representada e mensurada por meio de uma seção longitudinal e outra transversal, cuja direção sempre foi em relação do fluxo de água, determinado pelas setas de direção de escoamento superficial. Para cada seção foi utilizada uma distância de 100 metros do terreno, dividido e representado nos resultados pelo estaqueamento padrão conforme Espartel (1987), onde uma estaca é igual 20 m de distância. Esse padrão permite mensurar e representar a curvatura no perfil e no plano a cada mudança de direção da superfície, sendo detectado pelo programa computacional *AutoCad Civil 3D*. As relações sobre as formas de relevo da área experimental foram baseadas no padrão proposto por Valeriano (2008), apresentado anteriormente na Figura 1.

Para a espacialização dos dados de condutividade hidráulica saturada utilizou-se o sistema de coordenadas geográficas WGS 1984, *World Geodetic System 1984*, no programa computacional *ArcGIS 10.3*. Essas informações foram recortadas pelos limites do polígono da área experimental, demarcado no levantamento topográfico planialtimétrico. Isso possibilitou atingir quantificações e porcentagens dos índices.

Para a interpolação dos dados de condutividade hidráulica saturada, foi utilizado o método *Inverse Distance Weighted* (IDW), que utiliza a influência local do valor do ponto, diminuindo à medida que a distância entre eles aumenta (WEI; MCGUINESS, 1973). Este método de interpolação considera que a proximidade dos dados existentes influencia do que os mais afastados. Dessa forma, justifica-se o uso desse modelo de estatística descritiva, pois tem-se a distribuição irregular de unidades experimentais, porém com informação suficiente para satisfazer a metodologia de análise. Como produto dessa interpolação, foram geradas superfícies em formato de

imagem ou *raster*. Utilizou-se os resultados médios dos parâmetros analisados. Essa malha matricial de dados possibilitou espacializar e gerar cartogramas nas diferentes profundidades.

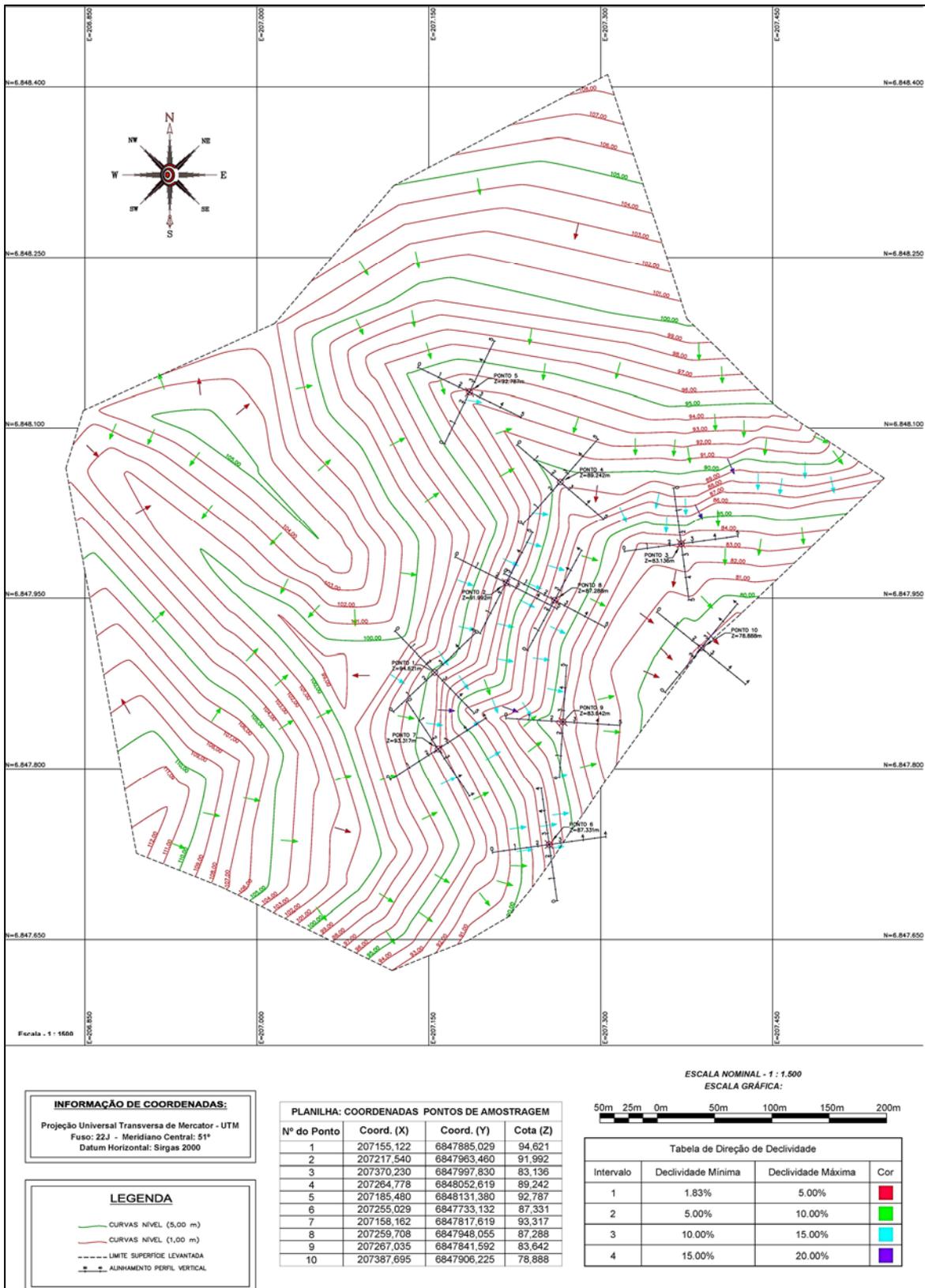
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussão do presente trabalho foram separados em seis capítulos. O primeiro descreve a topografia da área experimental. O segundo caracteriza morfológicamente ambos sistemas de manejo. Do terceiro ao sétimo, apresentou-se, nessa ordem, resultados e discussões da textura, densidade, porosidade e condutividade hidráulica saturada do solo. Em todos os capítulos buscou-se relacionar cada elemento central com a sua influência na dinâmica de água superficial e subsuperficial no solo.

6.1 FORMAS DO RELEVO DA ÁREA EXPERIMENTAL

A área experimental foi quantificada em 21 ha. A altitude nas áreas que potencialmente influenciam as unidades experimentais variou de 80 a 111 m. Da unidade experimental mais alta até a mais baixa, números 1 e 10, respectivamente, constatou-se variação altimétrica de 15 m. De modo geral, observa-se que a área de estudo está sob relevo predominantemente côncavo, que tende a convergir em direção à unidade experimental 10, localizada na região mais baixa e plana (Figura 4).

Figura 4 - Representação das isolinhas do relevo, setas de direção de escoamento e seções longitudinais e transversais na área experimental.



Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

O relevo onde está inserido o cultivo de ervais contém todas unidades experimentais situadas num intervalo de 5 a 15% de declividade, sendo considerado relevo ondulado conforme Embrapa (1997). As unidades experimentais 3, 4 e 5 estão localizadas num talvegue na área de ervais. Essa região caracteriza-se pelo encontro de duas vertentes opostas, criando então dois sistemas declives onde a água tende a convergir e escoar com direção final à área sob plantio direto. A convergência do talvegue junto a inclinação constatada, torna essa região mais passível de enxurradas que as demais regiões da área experimental. Entretanto, pela cobertura vegetal da área de ervais, esse processo hidrológico tende a ser amortecido. Dito isto, é possível inferir que o sistema de cultivo de ervais atua na detenção de escoamento superficial e consequente elementos do solo, provocado pela inclinação e convergência nessa região.

Na área com sistema plantio direto, percebe-se que a curvatura predominante é retilínea, atenuando o acidente topográfico em comparação ao sistema de ervais. A curvatura da encosta influencia forte na distribuição lateral ou interação dos processos pedológicos, hidrológicos e geomórficos, pois relaciona-se a concavidade ou convexidade ao controle da distribuição de água e matérias solúveis das regiões topograficamente maiores para as menores (CHAGAS, et al., 2010; MACMILLAN et al., 2000). Diante do exposto, pelo relevo não apresentar ênfase para a curvatura no plano, nas unidades experimentais 6, 7, 8 e 9 a tendência é ocorrer menos acúmulo e mais distribuição lateral dos processos hidrológicos e pedológicos. Isso porque as irregularidades da superfície do solo com dimensões de ordem menores que a sequência da vertente configuram-se como micro-topografias (YONG, 1972). Nesse sentido, os canais preferenciais gerados pelo relevo nas regiões das unidades experimentais 6, 7, 8 e 9 são difusos, fazendo com que o movimento de água e de partículas do solo seja governado por micro-elevações e micro-depressões, existentes ora naturalmente no terreno, ora em decorrência da rotatividade de culturas.

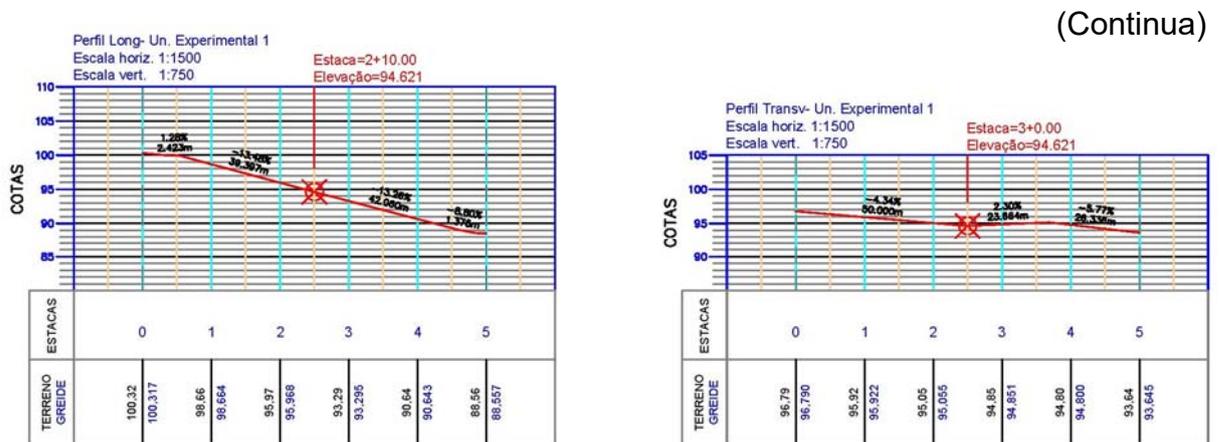
No sistema de manejo com plantio direto, a região que recebe mais fluxo acumulado é a disposto no entorno da unidade experimental 9. As principais contribuições à esta unidade advêm do entorno da unidade 1 e 7, não apenas pela convergência do movimento de água, como também por apresentar locais cuja declividade atinge valores de até 20%. Assim, dentro da região onde está inserido o sistema plantio direto, a unidade experimental 9 configura-se como principal receptora

de fluxo de água e de elementos do solo, decorrente dos caminhos preferenciais de escoamento, desenvolvidos na porção superior do relevo.

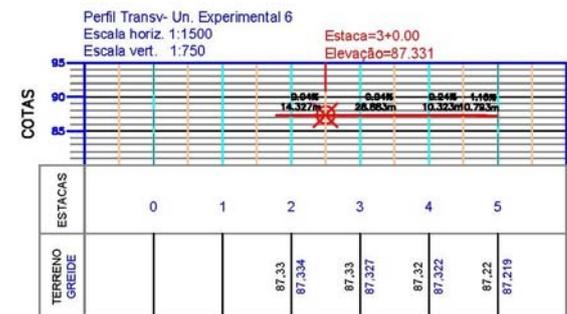
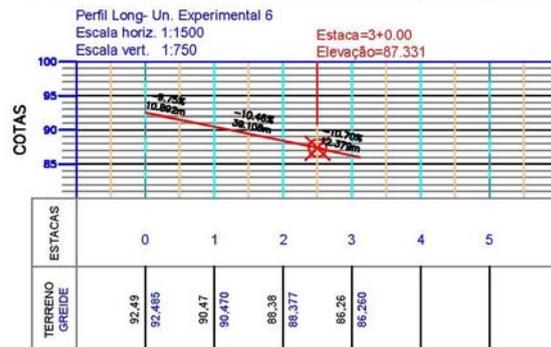
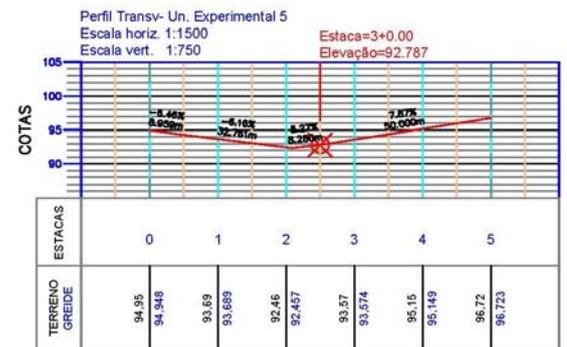
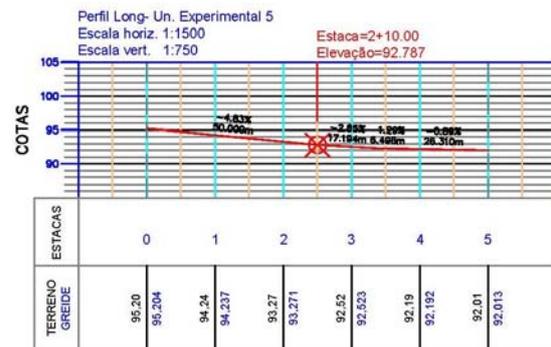
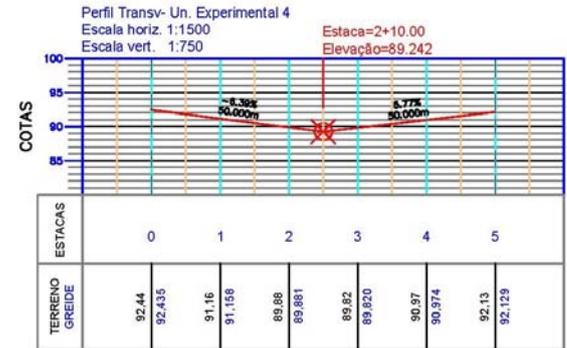
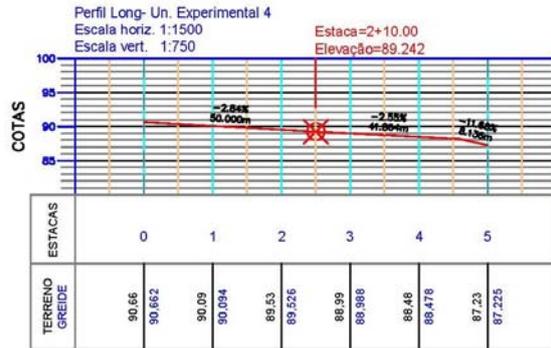
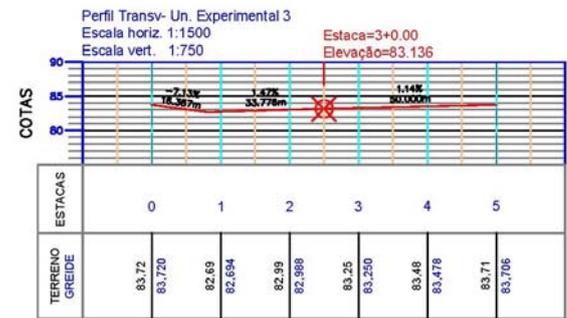
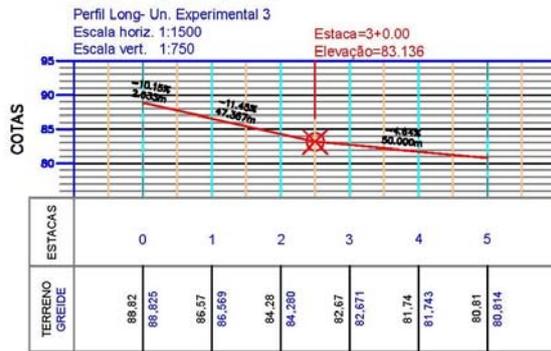
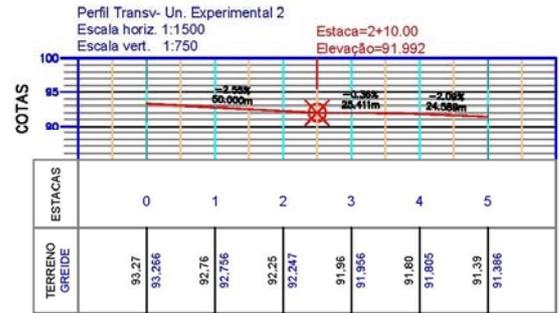
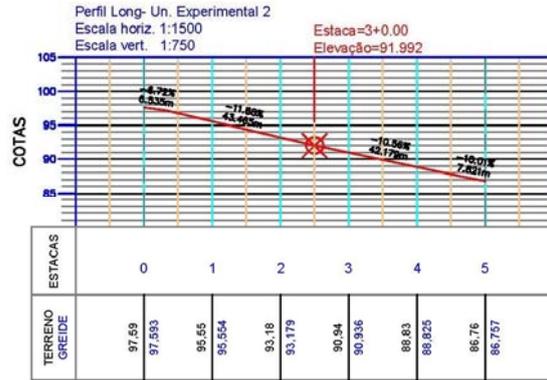
6.1.1 Formas de Vertentes das Unidades Experimentais

O perfil da vertente é a linha traçada sobre o terreno descrevendo sua inclinação, não podendo ser descritas por um simples ângulo, mas pelo grau de curvatura do segmento. (VELOSO, 2002). Diante do exposto, a curvatura no perfil e no plano foram expressas por meio de seções longitudinais e transversais, representando a curvatura no perfil e plano, respectivamente, de cada unidade experimental (Figura 5). A demonstração de cada perfil permitiu definir com precisão a ocorrência das formas vertentes, tanto de acordo com a direção da curvatura quanto ao ângulo formado a cada mudança direcional na superfície. Constatou-se que nenhuma das seções onde estão inseridas as unidades experimentais apresentou-se retilínea, pois segmentos das vertentes apresentaram ângulos variáveis.

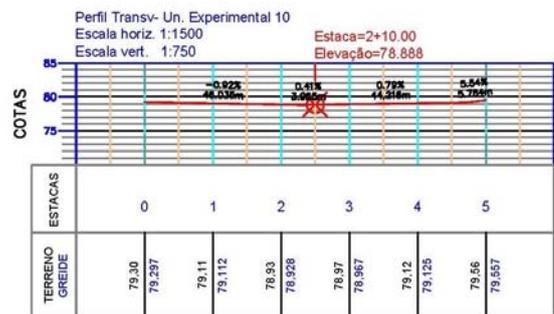
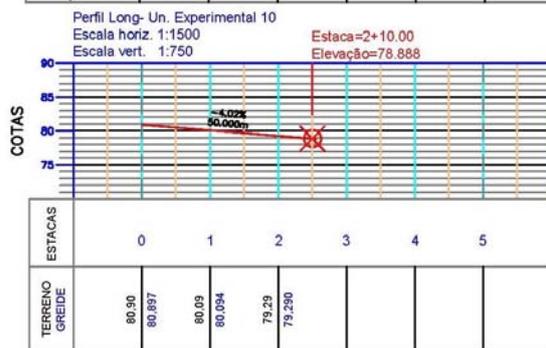
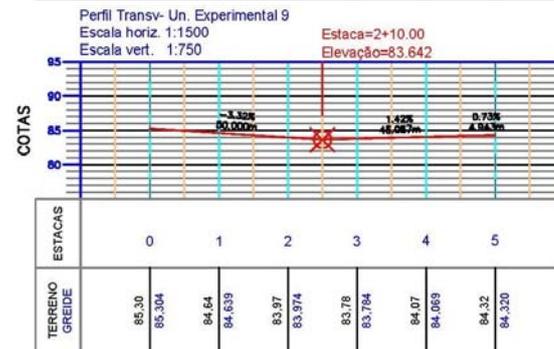
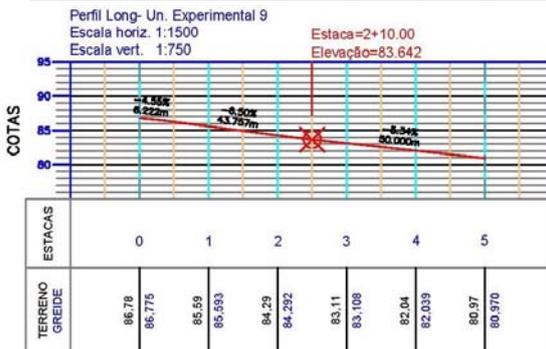
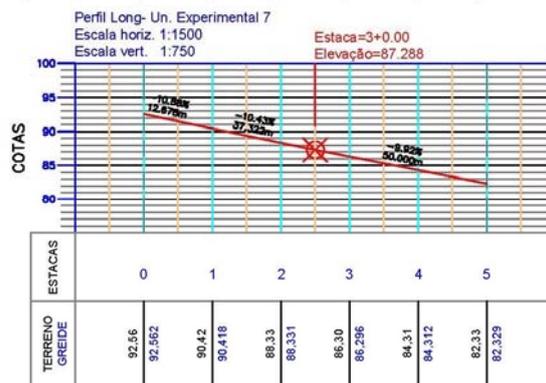
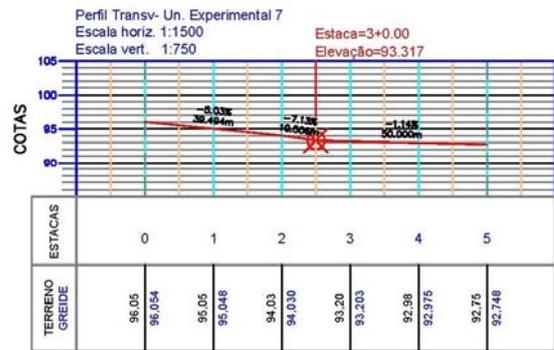
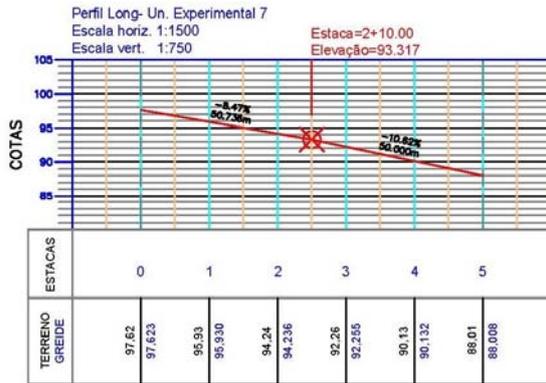
Figura 5 - Curvatura no perfil (seção longitudinal) e no plano (seção transversal) de cada unidade experimental da área de estudo.



(Continuação)



(Conclusão)



Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

A curvatura no perfil e no plano da unidade experimental 1, localizada na área de ervais, apresentou-se como côncava convergente, conforme Valeriano (2008) estando disposta num relevo de 10 a 15% de declividade, considerada ondulada conforme Embrapa (1997). Topograficamente, observa-se que essa unidade recebe

pouca influência de escoamento da região altimétrica superior, pois acima desta, o relevo comporta-se de modo divergente à direção desta. Assim, essa região funciona concentrando o fluxo e iniciando o caminho preferencial de escoamento, que se direciona à região onde está inserido o sistema plantio direto, confluindo principalmente para a unidade 9.

A unidade 2 está inserida entre duas mudanças na direção da superfície maiores que 1% de inclinação, onde o ângulo do terreno na seção longitudinal aumenta de -11,88% para -10,58% configurando a curvatura no plano da mesma com sendo côncava. Na análise da seção transversal, constatou-se aumento do ângulo de -2,55% para -0,36%, representando a unidade convergente. Relacionando a branda mudança de ângulos do relevo côncavo convergente com a predominância de declividade entre 10 a 15%, na região da unidade experimental ocorre minimamente movimentos confluentes à um único ponto. Porém, a mesma é favorecida pelo declive e, conforme as setas de escoamento, a tendência é a velocidade de escoamento ser incrementada até as proximidades da unidade 8, onde o terreno torna-se mais nivelado.

A unidade 3 é composta de curvatura côncava no perfil e divergente no plano, conforme os ângulos das formas de vertente (Figura 5) está localizada no final de um talvegue que compõe uma faixa da área de ervais. É essa região que recebe não somente as contribuições acumuladas do restante do talvegue, mas também de cotas topograficamente maiores com locais que chegam a atingir valores de até 20% de declividade. Salienta-se, contudo, que a competência do escoamento superficial diminui em função da cobertura vegetal existente na área de ervais, que cria obstáculos naturais à dinâmica de água (Figura 6). Além disso, a declividade torna-se branda após a passagem pela unidade 3, com valores entre 1,83 a 5%.

Figura 6 - Fisionomia da área de ervais, composta de vegetação de grande e médio, e serrapilheira sobre o solo.



Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

A unidade experimental 5 configura-se como a cabeceira de drenagem da área de ervais, localizada no início do talvegue da área de ervais. Sua curvatura é côncava no perfil e, fortemente convergente no plano (16,33% do início ao fim da seção transversal). Conjuntamente ao intervalo de declividade entre 10 a 15%, o fluxo de água de toda a região acima da área experimental conflui sobre essa unidade, escoando de modo concentrado em direção à unidade 4. Esta última também acompanha a convergência do relevo, com forte variação no ângulo, maior que 10%. Essa constatação demonstra que, sobre o talvegue, existe grande potencial de concentração de escoamento, configurando-se como canal rápido de fluxo de água e também de arraste de elementos do solo.

A formas de vertente constatada para a unidade 6 diferiu-se das demais na área experimental, pois apresenta curvatura convexa no perfil e, um segmento retilíneo ao longo de sua posição. Nessa condição, a região da unidade 6 funciona como difusor do fluxo do escoamento superficial. As distribuições são laterais e os caminhos preferenciais são dispersas e influenciados por pequenas depressões do relevo.

Verificou-se que a função topográfica das regiões onde estão inseridas as unidades experimentais 8 e 9 são bastante similares. Estas são receptoras de fluxo

oriundo de intervalos de considerável declividade (entre 10 a 15%). A unidade 9 distingue-se um pouco em função da grande confluência observada em sua direção, advindas das cotas topograficamente maiores. Na região da unidade 8, a tendência de escoamento é ser retilíneo, convergindo apenas no fim na área experimental. Outra similaridade dessas unidades é que após estas, conforme a indicação do fluxo, a tendência é o relevo diminuir sua declividade para aproximadamente 5%. Assim, dentro da área com sistema plantio direto, da cota 87 até 84 m, tem-se uma faixa de amortecimento da velocidade de escoamento.

A unidade experimental 10 encontra-se na região mais baixa da área de estudo, região onde todo o fluxo tende a se concentra. Visualmente, observa-se que o espaçamento entre as curvas de níveis torna-se maior. De acordo com Christofolletti (1980), os processos morfogenéticos determinam a natureza da vertente e estas terminam onde estes processos deixam de atuar. Diante do exposto, a região onde se localiza a unidade 10 não se configura como vertente, mas sim como uma planície de inundação, acumulando-se água e sedimentos, pois diminui-se a competência do escoamento e eleva-se a da infiltração e deposição de elementos do solo.

6.2 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS

Ocorreu predominância de horizonte AB para o toda a área com sistema de manejo de erva-mate e sob rotação de culturas, na profundidade de 30 cm. Esse tipo de horizonte é caracterizado pelo aspecto escurecido, decorrente da influência de matéria orgânica, húmus, conjuntamente à notória frequência argilosa (BRAGA et al., 2005; COOPER; VIDAL-TORRADO, 2005). Em 60 e 90 cm de profundidade, em todas as unidades experimentais, visualizou-se horizonte B. Em praticamente todos os perfis do Latossolo estudado, a transição entre os horizontes observados foi difusa. Latossolo são bastante homogêneos em termos de horizonte até a 2 m de profundidade (BATISTA; PAIVA; MARCOLINO, 2014). Portanto, tal característica corresponde exatamente ao observado na área experimental, não havendo modificações abruptas até a 90 cm de profundidade. As outras características morfológicas constatadas estão expostas na Tabela 1, sendo discutidas nos próximos subcapítulos.

Tabela 1 – Descrição morfológica em 30, 60 e 90 cm de profundidade de cada unidade experimental, em Latossolo Vermelho Distroférico Típico.

Sistema de Manejo	Unidade Experimental / Profundidade (cm)	Cor Úmido	Mancha	Estrutura	Consistência	Raízes	Poros
Ervais	1 / 30	2,5R 3/4	f – FI	gr – 1 – fe	vfr	M	TU
	1 / 60	10R 4/6	c – ME	sba – 2 – fe	fr	-	TU
	1 / 90	10R 4/6	c – ME	sba – 2 – fe	vr	-	TU
	2 / 30	2,5R 3/3	f – FI	gr – 1 – fe	vfr	M	TU
	2 / 60	10R 4/6	f – FI	gr – 1 – fe	vfr	M	TU
	2 / 90	10R 4/8	f – FI	gr – 1 – fe	vfr	F	TU
	3 / 30	10R 3/4	f – FI	gr – 1 – fe	vfr	M	TU
	3 / 60	10R 3/4	f – FI	gr – 1 – co	vfr	F	TU
	3 / 90	10R 3/3	f – FI	gr – 1 – co	vfr	-	TU
	4 / 30	10R 3/4	f – CO	sbk – 2 – fe	fr	M	TU
	4 / 60	10R 4/6	f – VC	sbk – 2 – fe	r	-	IG
	4 / 90	10R 4/6	m – EC	sbk – 2 – fe	r	-	IG
	5 / 30	2,5R 3/4	f – FI	gr – 1 – md	vfr	M	TU
	5 / 60	10R 3/4	f – FI	gr – 1 – co	vfr	F	TU
	5 / 90	10R ¾	f – FI	gr – 1 – co	vfr	-	TU
Plantio Direto com Rotação de Culturas	6 / 30	10R 4/6	f – FI	gr – 2 – md	fr	F	TU
	6 / 60	10R 4/6	f – FI	sbk – 2 – co	fi	-	TU
	6 / 90	10R 4/6	f – FI	sbk – 2 – co	fi	-	TU
	7 / 30	10R 4/6	m – FI	gr – 1 – md	fr	F	TU
	7 / 60	10R 4/6	m – FI	gr – 2 – md	fr	-	TU
	7 / 90	10R 5/6	m – FI	gr – 1 – md	fr	-	TU
	8 / 30	10R 4/6	m – CO	gr – 3 – md	fr	-	TU
	8 / 60	10R 5/6	m – CO	gr – 1 – md	vfr	-	TU
	8 / 90	10R 5/6	f – FI	gr – 3 – md	vfr	-	TU
9 / 30	10R 4/6	f – FI	gr – 1 – md	vfr	F	TU	

9 / 60	10R 4/6	f – FI	gr – 1 – md	vfr	F	DT
9 / 90	10R 4/6	f – ME	gr – 1 – md	vfr	-	DT
10 / 30	10R 4/6	f – FI	gr – 1 – md	vfr	F	TU
10 / 60	10R 4/6	f – FI	gr – 1 – md	vfr	-	TU
10 / 90	10R 4/6	f – FI	gr – 1 – md	vfr	-	TU

Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016)

Legenda: gr – granular; abk – blocos angulares; sbk – blocos subangulares; f – pouco; m – médio; c – comum; FI – pequeno; ME - médio; CO – grosseiro; VC – muito grosseiro; EC – extremamente grosseiro; 0 – desestruturado; 1 – fraco; 2 – moderado; 3 – rígido; 4 – muito rígido; 5 – extremamente rígido; fe – pequena; md – média; co – grosseira; vfr – muito friável; fr – friável; r – rígido; vr – muito rígido; F – pouco; M – muito; TU – Tubular; DT – Tubular Dendrítico; IG – Irregular.

6.2.1 Cor Úmido e Manchas do Solo

A cor do solo é um atributo diagnóstico para detectar áreas de diferentes potencias de produção (CARMO, 2014). Ao passo que a cor vermelha representa boa drenagem de água, o tom cinza indica má drenagem (CURI, RESENDE, SANTANA, 1989). A matiz 10R foi preponderante em praticamente todos os perfis em todas as profundidades, indicando boas condições de drenagem do solo para os dois sistemas de manejo. Com exceção das unidades experimentais 1 e 4, os mosqueamentos foram pouco frequentes e de tamanhos muito pequenos, isto é, menores que 10 mm.

Em estudo sobre o efeito da cor do solo na produção do café, Carmo (2014) constatou menores rendimentos em solos cuja cor foi mais esbranquiçada e textura arenosa, pois a drenagem de água foi mais rápida, principalmente em menores cotas altimétrica. A drenagem, no caso dos referidos resultados, é prejudicial tanto para o ambiente, quanto para a perda de água e de sedimentos (LICHTENBERG; SHAPIRO, 1997; WEBER et al., 2003).

Os resultados obtidos a partir da análise dos atributos morfológicos no solo com cultivo de ervais foram contrários aos obtidos por Carmo (2014), pois obteve-se a união entre um horizonte AB argiloso com intensa microagregação e cor avermelhada. Neste caso, tanto a área de ervais quanto a sob rotação de cultura não descrevem o estado de saturação explanado por Vepraskas, Lindbo, Skaggs (2003). Em relação ao objetivo proposto, a cor do solo é um elemento homogêneo na área de estudo, não apresentando indicação de sinais de saturação. Em relação ao objetivo proposto,

pode-se inferir que a cor do solo 10 R, e suas variações visuais na tonalidade, para ambos sistemas de manejo, contribui para o estado permanente de boa drenagem desde a sua superfície até a 90 cm.

6.2.2 Estrutura e Consistência

Segundo a caracterização proposta por Schoeneberger et al. (1998), a estrutura do solo em todas as unidades experimentais da área com cultivo de ervais, e em 4 das 5 unidades da área com rotação de culturas, para 30, 60 e 90 cm de profundidade foi granular. Em praticamente todas as unidades experimentais, os grânulos foram estruturalmente fracos ou moderados. Ao passo que nas unidades 1, 2 e 4 seu tamanho pequeno (1 a 2 mm), nas unidades 7, 8, 9 e 10, a estrutura foi média (entre 2 a 5 mm). A consistência dessa estrutura na profundidade de 30 cm, para os dois sistemas de manejo estudados foi muito friável. Em 60 e 90 cm de profundidade, essa consistência se tornou menos friável, ainda que seja uma mudança muito pequena. Com essas duas características, tem-se que ambos sistemas de manejo possuem intensa microagregação muito frágil.

Em estudo sobre quantificação da resistência tênsil e friabilidade de Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto, Tormena et al. (2008) concluíram que tais parâmetros foram sensíveis à atuação desse sistema. No presente estudo, para o sistema plantio direto sob rotação de culturas, o espaço poroso do solo fica muito vulnerável à aplicação de cargas, que obstruem a comunicação de intra-agregados, oriundo da desconstrução deste. Em relação à dinâmica de água, o tráfego agrícola tende a selar a profundidade de 30 cm, impedindo a permeabilidade hídrica a profundidades maiores.

Logo, em relação ao objetivo proposto, a estrutura e consistência do solo de ambos sistemas de manejo não é deficiente e não demonstrou visualmente sinais de desconstrução. Contudo, são atributos morfológicos que não oferecem impedimentos a infiltração de água em 30 cm de profundidade, mas que devem ser analisados conjuntamente à densidade, porosidade e condutividade hidráulica saturada.

6.2.3 Raízes e Tipologia Porosa

Constatou-se a presença de muitas raízes sobre todas as unidades experimentais do solo com cultivo de ervais, principalmente até 30 cm. Apenas nas unidades experimentais 2, 3 e 9 foram observadas raízes em 60 cm de profundidade. Em alguns locais dos perfis de solo, as raízes foram mais espessas, horizontais e com grande comprimento. Essa observação permite-se inferir possível geração de caminhos preferenciais de fluxo de água sub-superficial do solo, que ocorrem conforme a disposição e direção das raízes. Ainda, os resultados obtidos indicam armazenamento de água no perfil do solo, seguida de espalhamento lateral, decorrente da fácil comunicação entre os microagregados, dos quais não foram interrompidos por mosqueamentos, pois estes últimos foram visualmente desprezíveis.

Em praticamente toda a área experimental observou poros com características tubulares, enquadrando-se como espaço poroso estrutural, conforme Ringrose-Voase (1987). Pela intensa microagregação também se visualizou poros texturais em diversas regiões do perfil do solo, para 30, 60 e 90 cm de profundidade. Como o Latossolo Vermelho é profundo e em estado avançado de maturação, não foram observadas fissuras nem traços de rochas, com exceção da unidade 4 que foi discutida isoladamente, no próximo capítulo.

Em 90 cm de profundidade na unidade 9 da área com rotação de culturas, observou poros dendríticos. Esses poros originam-se da atividade biológica e muitas vezes são chamados de bioporos (CASTRO, 2008). Curmi et al. (1994), estudando as propriedades hidráulicas de Latossolos, observaram que o bioporos desaparecem, quando submetidos a processos de compactação. No caso do presente estudo, embora a unidade 9 esteja localizada na área de rotação de culturas, estes tipos de poros não desapareceram em função de que o impacto do tráfego agrícola, que compacta a superfície e desconstrói os bioporos, não atingiu as profundidades de 60 à 90 cm. Na área de ervais observou-se aleatoriamente bioporos, mas com muita pouca frequência. Em relação ao objetivo proposto, tal constatação possui grande relevância hidrológica para o solo, principalmente em 60 e 90 cm, onde foram mais frequentemente encontrados. Logo, nessa região da área de estudo, é provável que ocorre maior armazenamento de água, bem como, este seja local de “atalho” para a drenagem profunda ou fluxo laterais subsuperficiais.

6.2.4 Distinções Morfológicas nas Unidades Experimentais

Nas unidades experimentais 1 e 4, principalmente nas profundidades de 60 a 90 cm, ocorreram características morfológicas distintas dos demais. Constatou-se agregados subangulares, com grandes mosqueados, estrutura moderada, muito grosseira e consistência rígida. Nessas unidades experimentais, observou-se transição abrupta para horizonte B, ao atingir a profundidade de 90 cm. Além disso, não foi observado enraizamento nessas profundidades.

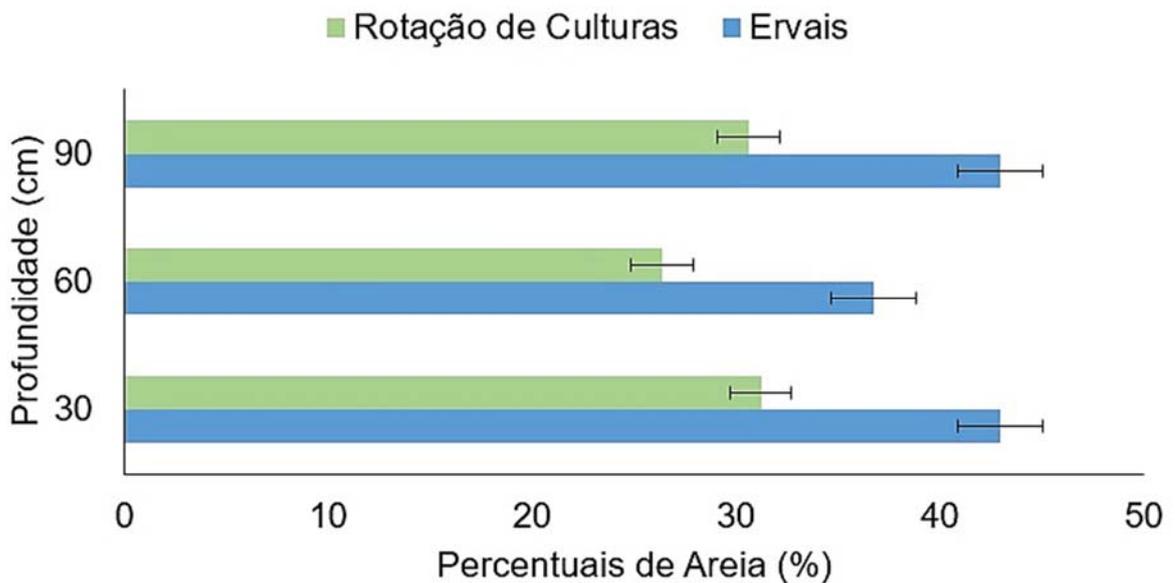
Devido à paisagem, drenagem e profundidade do solo, é possível que haja limitação da quantidade de água disponível à plantas (BRUBAKER et al., 1993; FANTAW; LEDIN; ABDU, 2006). Conforme o tamanho das partículas solo, este pode ser compacto e menos permeável, exceto para os solos com microagregados granulares, que o tornam bem permeável (GRAHAM; O'GEEN, 2010). Quando existem duas cores no solo no mesmo horizonte, e há predominância de uma delas, a água da chuva ou da irrigação demora mais tempo para alcançar o lençol freático do que um solo sem mosqueamento (GUERRA; SILVA; BOTELHO, 1999). Logo, em contraste as demais unidades experimentais da área de ervais, as características das unidades experimentais 1 e 4 indicam tendência ao desvio laterais, reduzindo drasticamente a verticalidade da água no solo até profundidade maiores para armazenamento. Essa possibilidade é corroborada em função do grande tamanho dos mosqueamentos observados nestas unidades experimentais, moderando o fluxo de água.

6.3 TEXTURA DO SOLO

Observou-se muita variação textural em 30 cm de profundidade em toda a área experimental. Isso implicou, conforme o proposto por Lemos e Santos (1984), em classificações texturais de franco-argilo-arenoso até argiloso, para a mesma profundidade. Para os dois sistemas de manejo, constatou-se elevados percentuais de argila, principalmente nas profundidades de 60 e 90 cm (Figura 7). Em 60 cm nas unidades experimentais 3 e 5, algumas repetições alcançaram valores de até 63% de argila. No solo com cultivo de ervais, ocorreu equilíbrio entre as frações arenosas e argilosas. Em muitos resultados, as frações de argila e areia foram estatisticamente superiores em 90 cm, ao passo que o silte reduziu-se significativamente. Os

percentuais de areia encontram-se distribuídos ao longo das camadas estudadas. Os resultados também indicam que a textura arenosa influenciou o tipo de estrutura do solo da área experimental. Nesse sentido, os percentuais de areia contribuem para a continuidade do movimento de água ao longo perfil do solo, até no máximo 60 cm.

Figura 7 - Percentual médio da fração areia para cada profundidade estudada, no solo com cultivo de ervais e em sistema plantio direto sob rotação de culturas.



Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

Em até 30 cm de profundidade, o percentual de areia era mais preponderante, mas diminuiu muito em 60 cm, onde o solo assumiu textura argilosa mais homogênea. A disponibilidade de água é influenciada pela textura argilosa (KLEIN e LIBARDI, 2000), sendo que este atributo físico indica a distribuição do diâmetro dos poros do solo, bem como a área de contato entre as partículas sólidas e a água, sendo por isso responsável pela força de retenção hídrica (REICHARDT, 1987).

Na área de ervais, o percentual médio de areia foi superior à área com rotação de culturas (Figura 8). O acidente do relevo, conjuntamente a eventos intensos de precipitações pluviais, pode estar deslocando partículas coloidais de argila, da área de ervais, para as regiões mais baixas, onde ocorre rotação de culturas. Tal assertiva pode ser verificada pela média geral dos percentuais de argila entre os dois solos, que foi de 44% na área de ervais, frente a 47% na área com fins agrícola. O grande

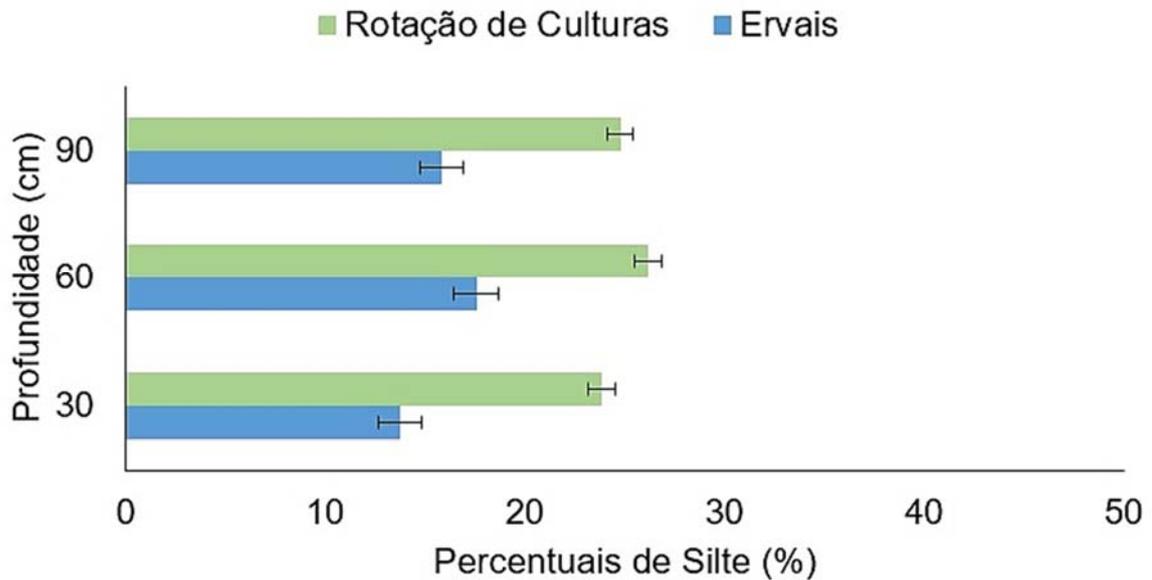
enraizamento vegetal da área com solo sob cultivo de ervais criou caminhos preferenciais de fluxo de água, o que contribuiu para a eluviação das partículas de argila.

Em estudo sobre caracterização o comportamento da variabilidade espacial das frações granulométricas de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a irrigação por pivô central, Castione et al. (2015), observaram alta variabilidade dos atributos texturais do solo em razão do relevo. A textura franco-argilo-arenosa foi preponderante a 30 cm profundidade na área de ervais. Em geral, solos protegidos por camada de serrapilheira mantêm suas frações de argila preservadas (BRAGA et al., 2005).

Na região de São Paulo Dematte e Holowaychuk (1977a), analisando propriedades granulométricas e químicas dos solos em topossequência, constataram teores de areia mais elevados nos horizontes superficiais, considerando um dos processos para explicar tal fato a remoção da argila por erosão. No presente trabalho, pode-se visualizar-se grande predominância da classe textural franco argilo-arenoso em na área de ervais, em comparação à área sob rotação de culturas. Os resultados dos percentuais médios de areia corroboram na inferência de que a área experimental tende a sofrer processos erosivo intenso, no caso de perda da vegetação presente superficialmente na área ervais.

A fração silte apresentou em menores percentuais em todas profundidades (Figura 8). Por meio de observações do perfil de solo, Schwabe (1987) e Diemer et al. (2008), pesquisando as propriedades e formação do solo na região de Ijuí, respectivamente, constataram os seguintes padrões: horizonte A espesso, variando de 30 a 60 cm aproximadamente, de coloração avermelhada escura, argiloso com mais de 60% de argila, horizonte B muito espesso, atingindo mais de 200 cm, de coloração vermelha escura, mais de 75% de argila, pouco estruturado, poroso; e horizonte C a mais de 200 cm de profundidade, espesso e composto por basalto intemperizado, possuindo maior percentual de silte.

Figura 8 - Percentual médio da fração silte para cada profundidade estudada, no solo com cultivo de ervais e em sistema plantio direto sob rotação de culturas.

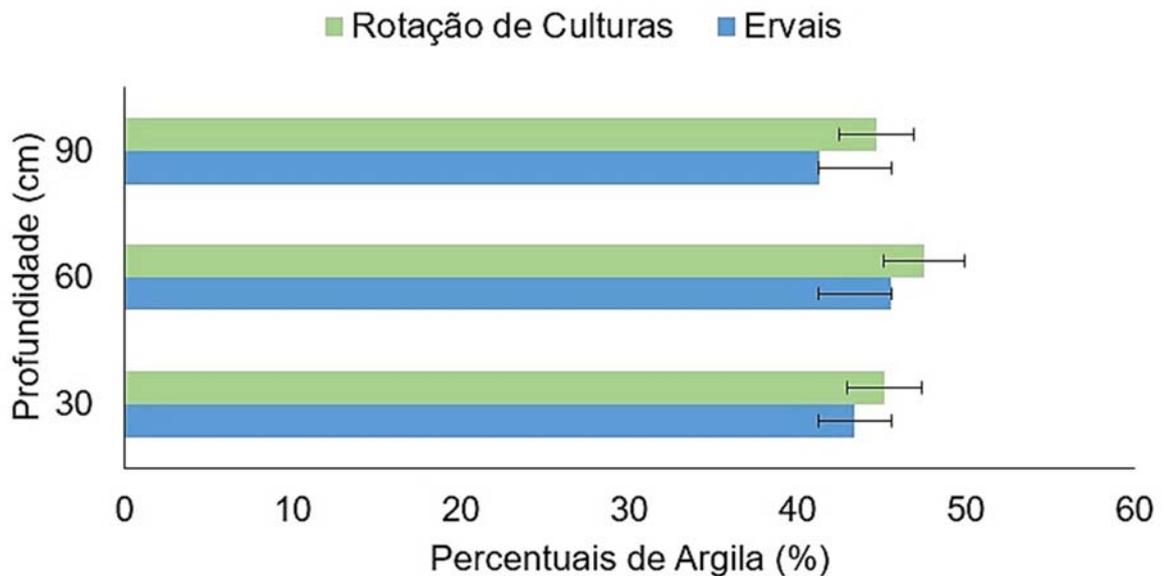


Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

É possível que o relevo na forma de terraço, existente nas unidades 1, 2, 3 e 4 (área de ervais), bem como nas unidades 7 e 8 (área com rotação de culturas) desfavorece a presença de areia e silte em 60 cm de profundidade. Isso acontece em função do maior tamanho e da massa da fração de areia, que desfavorece seu movimento a grandes distâncias verticais e horizontais.

Analisando a Figura 9, em 90 cm de profundidade, a textura do solo é predominantemente argilosa em 9 unidades experimentais de amostragem de solo, corroborando com os estudos nas proximidades da área experimental, que foram realizados por Schwabe (1987) e Diemer et al. (2008). A explicação para isso é a mobilização dessas partículas por meio de eventos intensos de precipitação pluvial. Pesquisando sobre padrões hidrológicos das chuvas na região de Ijuí (RS), no período de 1963 a 1993, Cassol et al. (2007) observaram média anual das chuvas erosivas de 1488 mm ano⁻¹; chuvas não erosivas no valor de 179 mm ano⁻¹; e média do período analisado de 1667 mm ano⁻¹. Estes autores ainda concluíram que o período de setembro a fevereiro concentra 60% da erosividade anual, sendo o mais crítico em comparação ao potencial erosivo das chuvas.

Figura 9 - Percentual médio da fração argila para cada profundidade estudada, no solo com cultivo de ervais e em sistema plantio direto sob rotação de culturas.



Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

Fundamentando-se no exposto, pode-se inferir que na área experimental ocorre o deslocamento de minerais com diâmetro e massa muito menores que o silte e argila. Esse processo ocorre em direção a profundidade de 90 cm em praticamente toda a área experimental. A estrutura do solo nessa profundidade, visualmente observada e anteriormente exposta (Tabela 1), é granular, fraca e de tamanho entre 2 a 5 mm (SCHOENEGER et al. 1998). Isso representa grande microagregação, configurando que os canais de comunicação criados pela união das partículas minerais são muito estreitos. Logo, combinando a estrutura e fração de argila elevada, é possível inferir que ocorra a retenção de água no perfil do solo em 90 cm.

Em estudo sobre armazenamento de água no solo, Fiorin, Reinert e Albuquerque (1997) concluíram que, em solos Argissolos Podzólicos com horizonte A pouco profundo e arenoso e com horizonte B textural, não são produtivos, em função das forças de capilaridade e adsorção, que impedem a água de ascender para próximos das raízes. Em contraste aos resultados dos referidos autores, os solos da área experimental caracterizaram-se com horizonte AB e B textural, indicando condições apropriadas para ascensão capilar de água no solo, mesmo para a profundidade de 30 cm. Ainda, em 60 cm no solo com rotação de culturas, as

consequências do processo de deformação são permanentes sobre solo. Isso explica o elevado percentual de partículas coloidais de argila frente a camada de 30 cm.

Assim, a 30 cm no sistema de manejo com ervais, frente ao restante da área de estudo, a água tende a infiltrar mais rápido, assumindo direção descendente de modo preponderante. Ao atingir a profundidade de 60 cm, o percentual de argila aumentou, representando o aumento da distribuição de partículas minerais com diâmetro inferior a 2 μm (CORÁ et al., 2009; MARCOLIN; KLEIN, 2011). Com isso, o espaço poroso entre as partículas deste tipo de mineral é menor, o que implica na redução da permeabilidade de água no perfil de solo para esta camada.

Conjuntamente a visualização da grande variação topográfica, o sistema de cultivo por ervais realiza a função de barrar escoamentos, que potencialmente tendem a levar consigo partículas minerais de argila para cotas do terreno topograficamente menores. Tal assertiva pode ser visualizada nas unidades 9 e 10. Em 60 cm, há maior homogeneidade de partículas minerais argilosas.

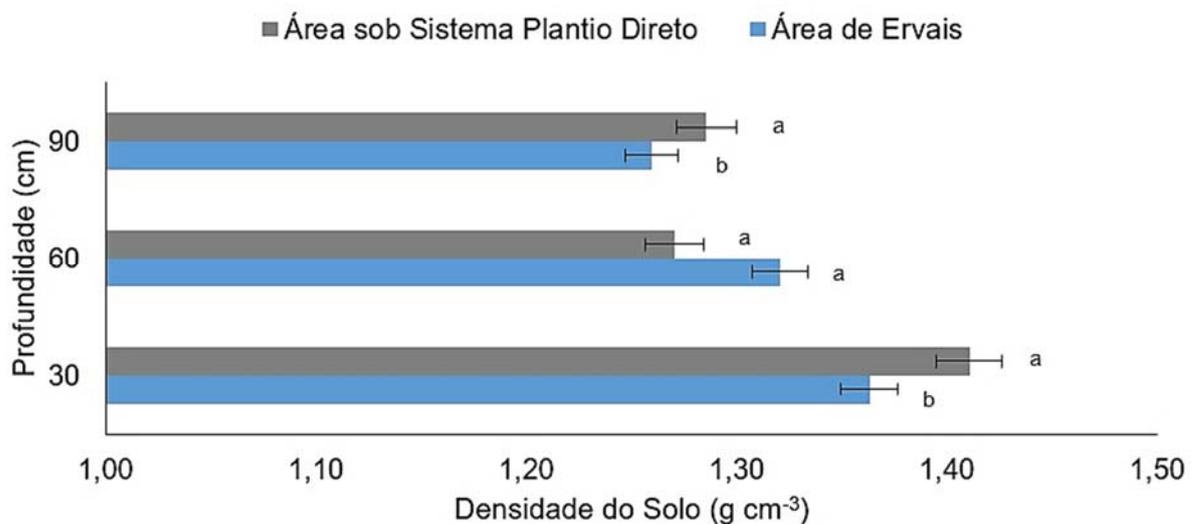
Verificou-se maiores percentuais de argila na zona do terreno que possuem menores cotas. Esse fato se deve às partículas mais finas, que são transportadas da parte do terreno com maior altitude para a de menor cotas. Estudando a variabilidade textural em área irrigada por pivô central em diferentes posições da paisagem, Castione et al. (2015) concluíram que a migração de argila para camadas subsuperficiais do solo é relacionada com a gênese do solo e ao carreamento de partículas pela água. O comportamento dos fluxos d'água foram investigados por Leão *et al.* (2010), tendo verificado que a forma côncava do terreno condiciona confluência ao movimento de partículas do solo, enquanto na faixa do terreno na forma convexa verificaram a inversão dos movimentos da massa do solo paralelamente ao sentido da vertente. No presente trabalho, 7 das 10 unidades experimentais apresentaram-se curvatura côncava convergente, indicando acompanhamento da forma do terreno e o movimento de partículas do solo na direção perpendicular ao sentido da vertente.

6.4 DENSIDADE DO SOLO

A densidade média do solo na profundidade de 30 cm com cultivo de ervais teve valor de 1,363 g cm^{-3} , ao passo que na área com rotação de culturas, o valor atingiu 1,411 g cm^{-3} (Figura 10). A média geral da D_s do solo na área experimental,

em 30 cm de profundidade, foi de $1,387 \text{ g cm}^{-3}$. Collares et al. (2011), encontraram densidade de $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ em estudo sobre aumento da densidade por pisoteio animal na mesma região. Estudando a permeabilidade do solo na região de Ijuí, Diemer et al. (2010) constataram densidade do solo média $1,374 \text{ g cm}^{-3}$ na faixa de 10 a 20 cm de profundidade. A D_s média do presente trabalho ficou entre os resultados dos referidos trabalhos realizados na mesma região. Tal resultado obtido não indica compactação conforme o que Camargo e Alleoni (1997) concluíram, pois, estes autores consideram-se crítica a densidade do solo no valor de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ para solos franco-argilosos e argilosos. Kaiser et al. (2009) constataram densidade do solo em estado crítico no valor de $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ em estudo de intervalo hídrico ótimo em Latossolo. Portanto, em 30 cm da área experimental, não se pode afirmar que o solo esteja compactado, conforme os resultados e conclusões existentes na literatura.

Figura 10 - Densidade média do solo em 30, 60 e 90 cm, nos dois sistemas de manejo estudados.



Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

* Médias com a mesma letra minúscula na horizontal não diferem significativamente pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

O solo com cultivo de ervais foi estatisticamente menos denso que o solo com rotação de culturas. Mota et al. (2011), avaliando a qualidade dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho, sob diferentes manejos e em profundidades de até 30 cm, constataram média de densidade de $1,21 \text{ g cm}^{-3}$; $1,43 \text{ g cm}^{-3}$; e $1,44 \text{ g cm}^{-3}$ para mata

nativa, cana de açúcar e pastagem, respectivamente. O tráfego agrícola deforma o solo (ORTIGARA et al., 2014), comprimindo o espaço poroso e fragmenta seus agregados (MAZURANA et al., 2011), mitigando a infiltração de água em função da descontinuidade da comunicação porosa da superfície com a sub-superfície (DIAS JÚNIOR, 2000). Fernandes (2015), pesquisou o efeito da compactação por tráfego agrícola em Nitossolo Vermelho e Latossolo Vermelho, com conteúdo de água distintos, e concluiu que em ambos solos ocorreu aumento da área e profundidade de recalque, densidade do solo, redução da macroporosidade e velocidade de infiltração de água no solo. Assim, pode-se inferir que o sistema de manejo com rotação de culturas reserva menos água que os ervais, em função de obstruções à continuidade porosa do solo causada pelo tráfego agrícola.

Em 60 cm, a área de ervais apresentou D_s média de $1,321 \text{ g cm}^{-3}$, sendo 3,7% maior que na área com rotação de culturas, cujo valor foi de $1,272 \text{ g cm}^{-3}$. Contudo, os resultados da média de densidade do solo, em 60 cm, não foram estatisticamente diferentes entre si. Isso significa que não se pode afirmar que as diferenças de valores de D_s estão associados efeitos provocados sobre os distintos sistemas de manejo.

Mota et al. (2011) constataram que os sistemas de manejos para cana de açúcar, pastagem e mata nativa exercem degradação do solo, em função da variação de seus atributos físicos, mais perceptível nas camadas superficiais. O estado de compactação é mais verificado na profundidade de até 10 cm (GENRO JUNIOR; REINERT; REICHERT, 2004). Verificou-se algumas destas conclusões, pois em muitas unidades experimentais, conforme o aumento da profundidade, a densidade do solo diminuiu, com texturas argilosas em percentuais superiores a 40%, após 60 cm (Figura 4). Salienta-se, porém, que na unidade experimental 6, que faz parte de área com rotação de culturas, obteve-se D_s expressivamente maiores que as demais, no valor de $1,6 \text{ g cm}^{-3}$. Baseando-se em Schoeneberger et al. (1998), nos resultados obtidos na Tabela 1 e em D_s médio à 60 cm, pode-se inferir que essa unidade experimental detém poros tubulares de volume estreito e, em parte, descontinuados da superfície à sub-superfície em função da alta densidade.

Na profundidade de 90 cm, D_s do solo com cultivo de ervais foi estatisticamente inferior à área com rotação com rotação culturas, com $1,259 \text{ g cm}^{-3}$, frente a $1,285 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente. A média de D_s à 90 cm, nos dois sistemas de manejo, foi menor em relação a profundidade de 30 cm. Comparando as profundidades de 60 e 90 cm, apenas D_s do solo com rotação foi ligeiramente superior, com $1,272 \text{ g cm}^{-3}$ frente a

1,285 g cm⁻³, respectivamente. Para o sistema de manejo com rotação de culturas, a redução da média de densidade e a distinção estatística constatada indicam que o impacto do tráfego agrícola existe mas apresentou-se menos intenso. Pode-se inferir que as forças de compactação do solo se difundem mais conforme o aumento de profundidade, na presente área de estudo.

Para a área com cultivo de ervais, a diminuição D_s não está associada a mitigação de impacto pelo tráfego agrícola, porque nessa área não é utilizado maquinário. Na área de ervais a diminuição da densidade conforme o aumento da profundidade tem relação com os resultados obtidos de textura (Figura 4). Righes et al. (2002a), analisaram a densidade de um solo sob doze anos de cultivo de soja em sistema de plantio direto. Estes autores constataram, para as faixas de profundidades de 2,5 a 15 cm; 15 a 30 cm; 30 a 40 cm; e 40 a 100 cm, um decréscimo sequencial de densidade do solo, em g cm⁻³, nos valores de 1,327; 1,242; 1,217; 1,145, respectivamente. Israelsen e Hansen (1965) detectaram solos argilosos com densidade de 1,25 g cm⁻³, argilo-arenosos no valor 1,30 g cm⁻³.

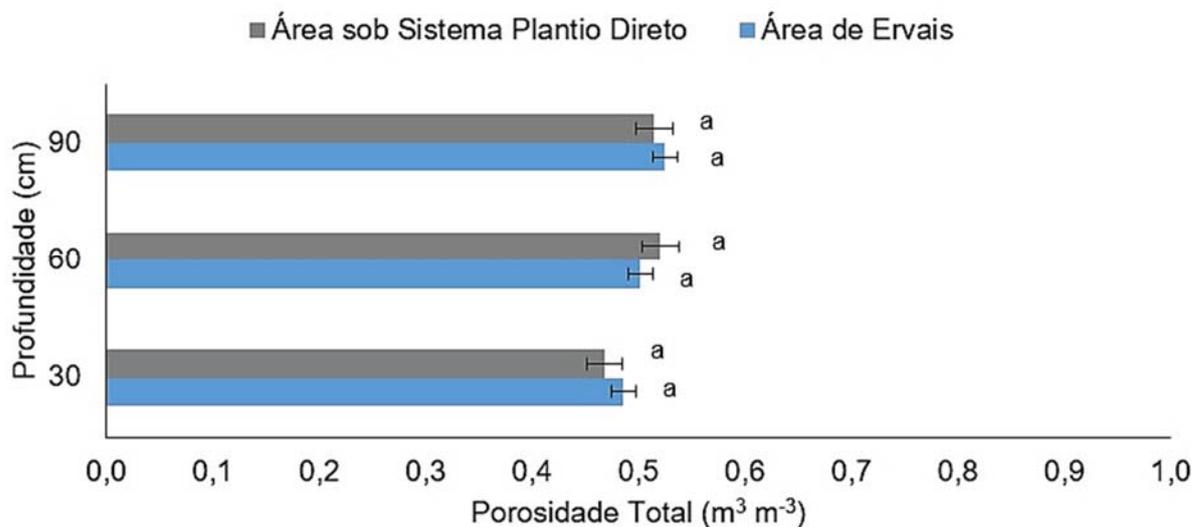
As conclusões obtidas por Righes et al. (2002a), como também por Israelsen e Hansen (1965) corroboram com as do presente estudo, para a área de ervais. Alterações na densidade do solo podem variar consideravelmente, conforme a condição textural da região (Curtis e Post, 1964). Assim, na área de ervais, conforme o aumento da profundidade, observou-se ligeiro decaimento nos percentuais de argila em 90 cm, predominando mais partículas minerais de areia. Nessa profundidade, ainda, não foram observadas durante a análise morfológica dos perfis de solo raízes (Tabela 1).

Avaliando a influência de atributos físicos de Latossolo Vermelho Distrófico na retenção de água, Beutler et al. (2002), constatou maior correlação positiva entre a densidade com retenção de água, quando comparado com matéria orgânica. Associando tais resultados à dinâmica de água, pode-se inferir que o aumento do percentual de partículas de areia não implica em muita diminuição do armazenamento de água, dada classe textural argilosa existente em 90 cm, e o pequeno aumento deste atributo em relação a 60 cm.

6.5 POROSIDADE TOTAL DO SOLO

Em todas as profundidades estudadas, a média da porosidade total variou pouco ao comparar-se a área de ervais com a de rotação de culturas. Não foram detectadas diferenças significativas entre os sistemas de manejo para a porosidade total (Figura 12). Contudo, a porosidade total, em 30 cm de profundidade, variou de 0,35 a 0,53 m³; em 60 cm, variou de 0,48 à 0,54 m³; e em 90 cm, a variação foi de 0,47 à 0,57 m³. Tais valores aproximam-se do espaço poroso do solo, que estão em 25% gases e 25% água (KLEIN, 2014). A explicação para a variação nos dados e para as médias não significativas é que, em muitos solos do Brasil, existe uma camada superficial que é arenosa e uma sub-superficial argilosa, muito compactada, o que resulta em uma diferença quanto a porosidade (RIGHES; SILVA, 2009). A afirmação destes autores é compatível aos resultados do presente estudo.

Figura 11 – Porosidade total do solo em 30, 60 e 90 cm, nos dois sistemas de manejo estudados.



Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

* Médias com a mesma letra minúscula na horizontal não diferem significativamente pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

Em 30 cm de profundidade, ocorreram variações na porosidade total de 38 à 53%, ou seja, 15% de oscilação. Mota et al. (2011), em estudo de sobre qualidade dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico Típico, sob diferentes manejos e em profundidades de até 30 cm, constataram porosidade total no valor de

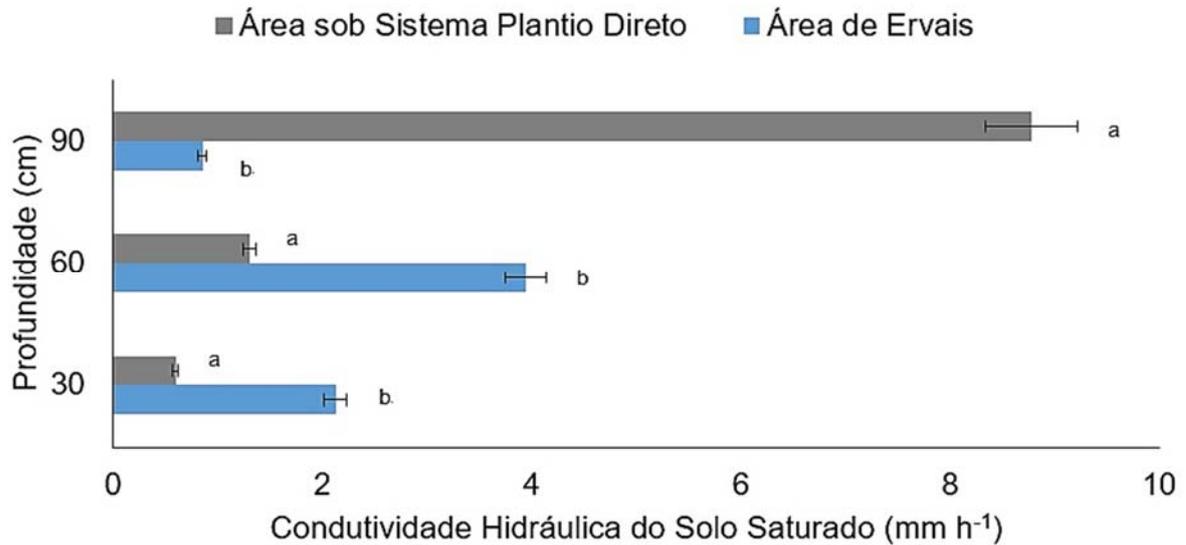
0,53 m³ m⁻³; 0,45 m³ m⁻³; e 0,45 m³ m⁻³ para mata nativa, cana de açúcar e pastagem, respectivamente.

Righes et al. (2002a), analisaram a densidade e a porosidade total de um solo sob doze anos de cultivo em sistema de plantio direto. Estes autores constataram, para as faixas de profundidades de 2,5 a 15 cm; 15 a 30 cm; 30 a 40 cm; e 40 a 100 cm, um aumento sequencial da porosidade total, sendo estes em m³ m⁻³ nos valores de 0,509; 0,541; 0,576, respectivamente. A dinâmica de água é mais dependente de características intrínsecas do solo, resultados da ação integrada da textura, estrutura, mineralogia e matéria orgânica (BEUTLER et al., 2002; CARDUCCI, 2011; GUPTA; LARSON, 1979). Em relação ao objetivo proposto, a porosidade total dessa camada é representativa de suprimento hídrico ao solo da área experimental, cujas características foram bastante próximas do ideal e estão associadas a integração de poros texturais e estruturais, em grande parte, intra-agregados.

6.6 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM SOLO SATURADO

Pela condutividade hidráulica pode-se expressar a facilidade com que a água se movimenta no perfil de solo (KLEIN, 2014). Baseado nisso, constatou-se em 30 cm de profundidade, K_o no valor de 2,126 mm h⁻¹ para a área de ervais, e 0,595 mm h⁻¹, para a área com rotação de culturas (Figura 12). O mesmo ocorreu em estudo sobre os efeitos do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de diferentes solos, realizados Silva e Kato (1997), dos quais constataram 27,7 mm h⁻¹ no Cerrado virgem, 1,3 mm h⁻¹ em área de plantio direto e 8,2 mm h⁻¹ em solo sobre manejo convencional. Os resultados indicam que o solo que não sofre tráfego agrícola, possui muito mais movimento de água que os solos com sistemas de cultivo agrícola.

Figura 12 – Condutividade hidráulica saturada em 30, 60 e 90 cm de profundidade, nos dois sistemas de manejo estudados.



Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

* Médias seguidas de mesma letra na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

Na comparação entre os sistemas de manejo, Silva e Kato (1997), traduziram o termo e os resultados de condutividade hidráulica saturada como sendo a infiltração máxima do solo pesquisado. Analogamente, a 30 cm de profundidade, a condutividade hidráulica do solo com rotação de culturas foi estatisticamente superior em função da constante escarificação neste. Escarificar o solo significa quebrar a camada densa superior para formar a rugosidade superficial (SILVA, RIGHES, 2009). Dito isto, a rugosidade pode ter aumentado o volume poroso do solo com rotação de culturas, até 30 cm, que então possivelmente fez com que K_0 fosse superior ao solo com cultivo de ervais.

Kertzmann (1996) analisou K_0 em diferentes profundidades de um solo submetido a dois tipos de manejo, e constatou valores 124,9 cm h⁻¹ em mata nativa e 47,4 cm h⁻¹, em plantio direto, ambos a 40 cm. Este autor concluiu que as distinções ocorridas entre o solo de mata nativa e o sob plantio direto deve-se as pressões e ações ocasionadas pelas máquinas agrícolas. Tais conclusões corroboram às do presente estudo, principalmente nas unidades experimentais 1, 2 e 3, sobre o solo da área de ervais (Figura 12).

Em 30 cm, o comportamento da água variou muito espacialmente, indicando mais movimento hídrico nos locais de textura arenosa, como nas unidades experimentais 1, 2 e 3. Entretanto, constatou-se fluxos horizontais muito lentos nas unidades experimentais 6, 7 e 8. Atribui-se estes resultados a compactação e a porosidade textural nas referidas unidades experimentais, exerceram influência no fluxo lateral subsuperficial a 30 cm. Em eventos de precipitações pluviais, o lençol de água pode ascender até os níveis menos profundos, contribuindo para o escoamento superficial. Esse também é o caso das diferenças constatadas nas unidades experimentais 4 e 5. Contudo, as elevadas frações de argilas não implicam em barramento do fluxo, mas são responsáveis pela tortuosidade do mesmo. Assim, mesmo apresentando espaços porosos tubulares, a estrutura granular do solo, vinculada ao aumento da textura argilosa, domina o padrão de fluxo, pois está integrada a todos os resultados de K_0 .

Na unidade experimental 4, observou-se visualmente a exposição de rocha decomposta e pela configuração porosa irregular. Nessas condições, a condutividade hidráulica saturada apresentou-se lenta, pois a água transmite-se por pequenas fendas da rocha em decomposição, que aleatoriamente pode atingir o meio poroso do solo já maturado.

Na área com rotação de culturas, a união de duas características físicas implicou na diminuição do movimento lateral da água, quando esta alcança profundidades de 60 cm. Essas características foram a média da textura em 47% de argila, e densidade chegando até $1,6 \text{ g cm}^{-3}$. Isso implica ao solo condições hidráulicas restritas, reduzindo as contribuições de fluxos laterais, como também redistribuição interna de água no solo.

Para as unidades experimentais 1 e 2, intenso enraizamento observado *in loco*, combinado a constatação de bioporos observados em menos volume, influenciou na criação e na tortuosidade dos caminhos preferenciais de água no solo. Com isso, as raízes e os bioporos facilitam o armazenamento de água frente às demais unidades experimentais da área de estudo.

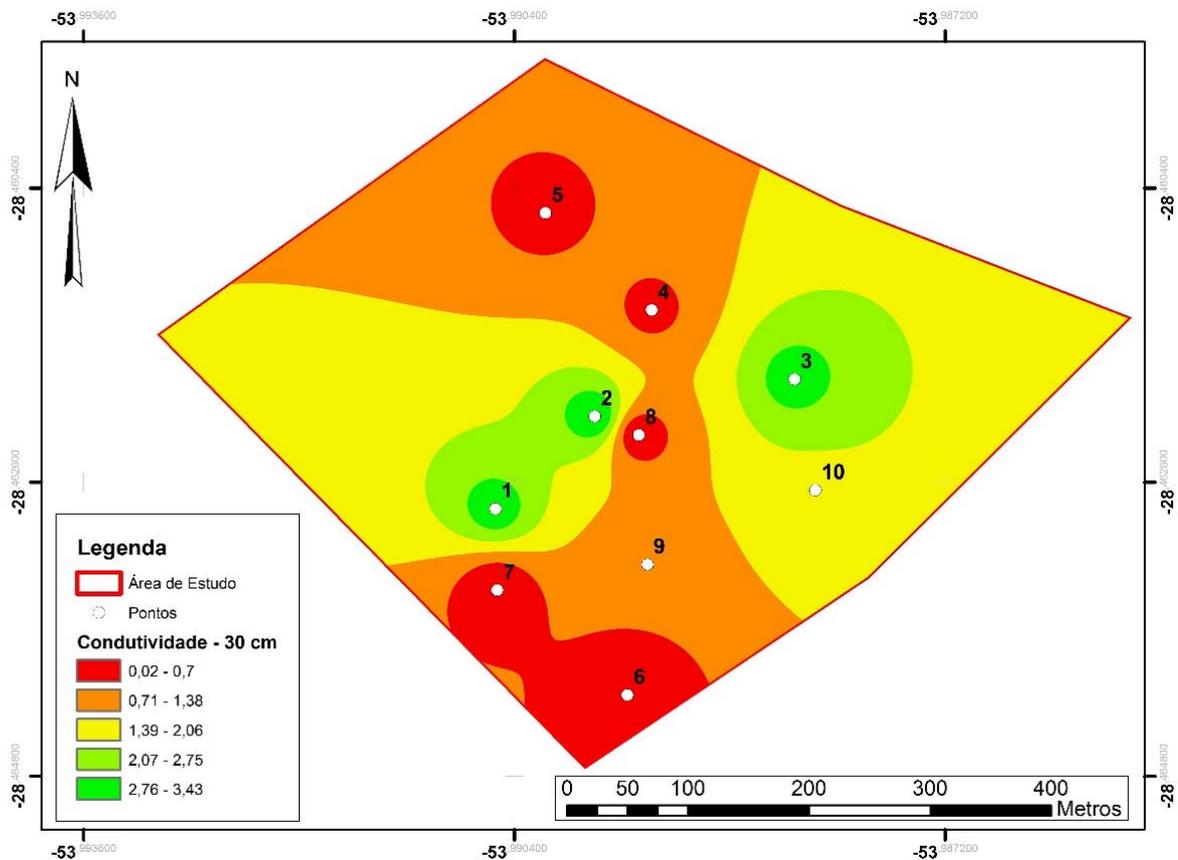
Ressalta-se que à determinação de K_0 pode ter grande variabilidade, mesmo sob condições laboratoriais controladas (BOUMA; JONGMANS; STEIN, 1989; TEIXEIRA, 2001; VIEIRA et al., 1981). Contudo, a elevada variabilidade de K_0 , traduz maior redistribuição interna de água no solo, atingindo partes mais profundas e de maior infiltrabilidade (ELLIES; GREZ; RAMIREZ, 1997; KLEIN, 2014).

Swarowsky (2010), em pesquisa aprofundada sobre a ligação da estratigrafia do solo com a geração de fluxo lateral sub-superficial, em uma floresta de carvalho em Sierra Nevada, na Califórnia (EUA), constatou valor médio de K_o vertical de $2,76 \text{ mm h}^{-1}$. O mesmo pesquisador obteve tais resultados em 70 cm de profundidade, cuja fração de argila foi 47,7% e densidade do solo em $1,9 \text{ g cm}^{-3}$. Conjuntamente a obtenção de dados de conteúdo de água no solo nesta profundidade, este autor atribuiu os resultados de baixa condutividade hidráulica a este horizonte do solo com alto percentual de argila, que provêm continuidade hidrológica por meio de um forte controle de movimento de água no perfil de solo. Tais como as conclusões do referido autor, na presente área de estudo, muitas evidências indicam que a redistribuição interna de água no solo seja governada, em maior parte, pela elevada fração de argila existente em 60 e 90 cm. Nessa profundidade, a forma de relevo não atua de modo preponderante. A velocidade dessa redistribuição interna de água solo tende a ser lenta, com transmissão vertical à 90 cm inferior a 9 mm h^{-1} .

6.6.1 Espacialização da Condutividade Hidráulica Saturada

Por meio da espacialização das médias de condutividade hidráulica saturada, foi possível visualizar a variação deste parâmetro do solo. A distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada é essencial para analisar a erosão do solo e escoamento superficial (ALVARENGA et al., 2011). Tal assertiva dos referidos autores corrobora com os constatados na espacialização de K_o . Pela espacialização dos dados de condutividade hidráulica saturada (Figura 13), visualizou-se variações de $0,02$ até $3,43 \text{ mm h}^{-1}$ na profundidade de 30 cm, ao longo da área experimental. Nos pontos 6, 7 e 8, referentes ao solo com rotação de culturas, obteve-se condutividade hidráulica saturada entre $0,02$ à $0,7 \text{ mm h}^{-1}$. Já no solo com cultivo de ervais, obteve-se variação de condutividade hidráulica saturada de $2,76$ à $3,43 \text{ mm h}^{-1}$. Das 5 unidades experimentais de cada sistema de manejo, constatou-se que os 3 pontos da área de ervais tiveram condutividade hidráulica saturada superior 2 mm h^{-1} , comparando com a área de rotação de culturas, os quais foram já mencionados acima.

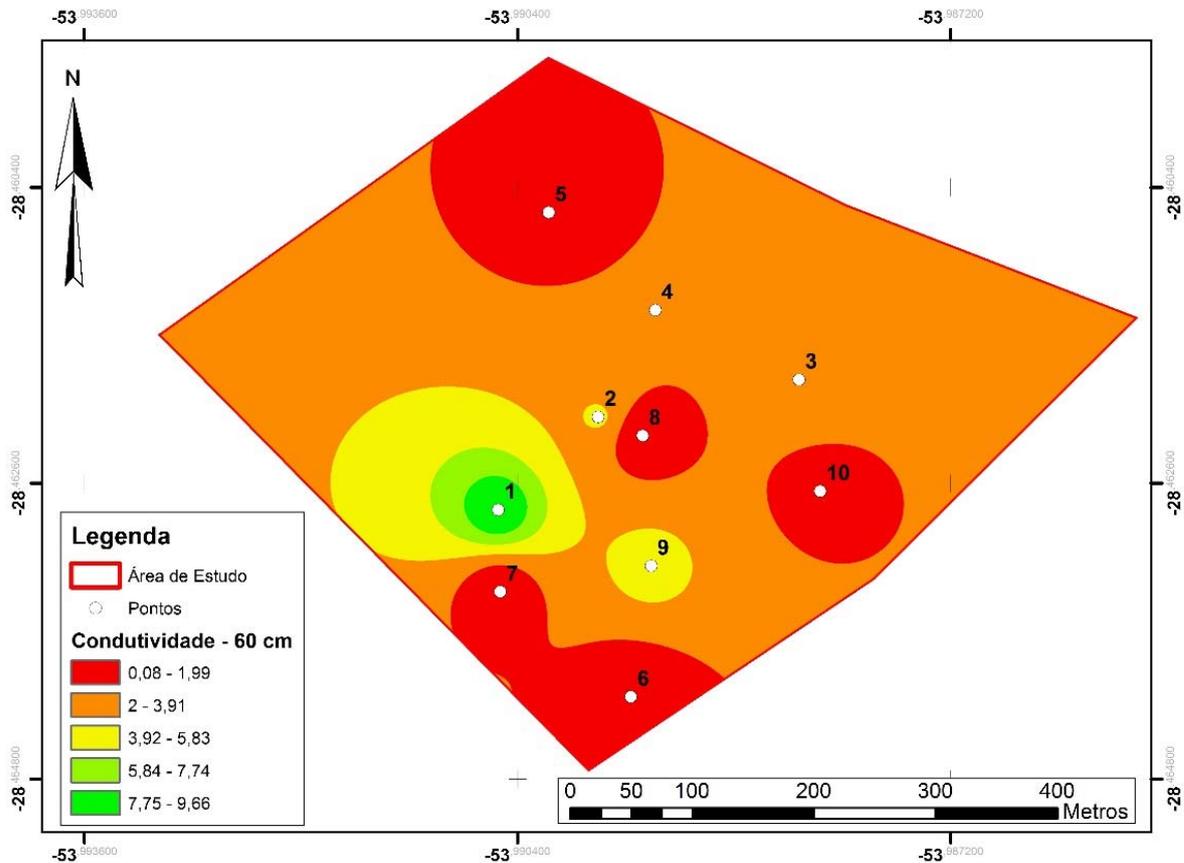
Figura 13 - Condutividade hidráulica saturada do latossolo vermelho distroférico típico da área experimental, para a profundidade de 30 cm.



Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

Em fluxo preferencial, a água se move mais rapidamente em determinadas partes do perfil do solo, resultando em uma frente de umedecimento irregular (WARSTA et al., 2013). No caso da área experimental, a diferença de valores de condutividade hidráulica saturada entre a área de ervais e com rotação de culturas, na profundidade 30 cm, ocorreu em função do elevado percentual de areia observado. Em 60 cm de profundidade, os percentuais de silte foram maiores. A areia e o silte oferece menos impedimentos ao deslocamento de água que a argila, porque suas partículas possuem dimensões muito superiores, resultando em conexões de inter-agregados com mais espaço entre si. Por essa característica, é maior o espaço poroso do solo com percentuais de areia e silte distribuídos no perfil (Figura 14).

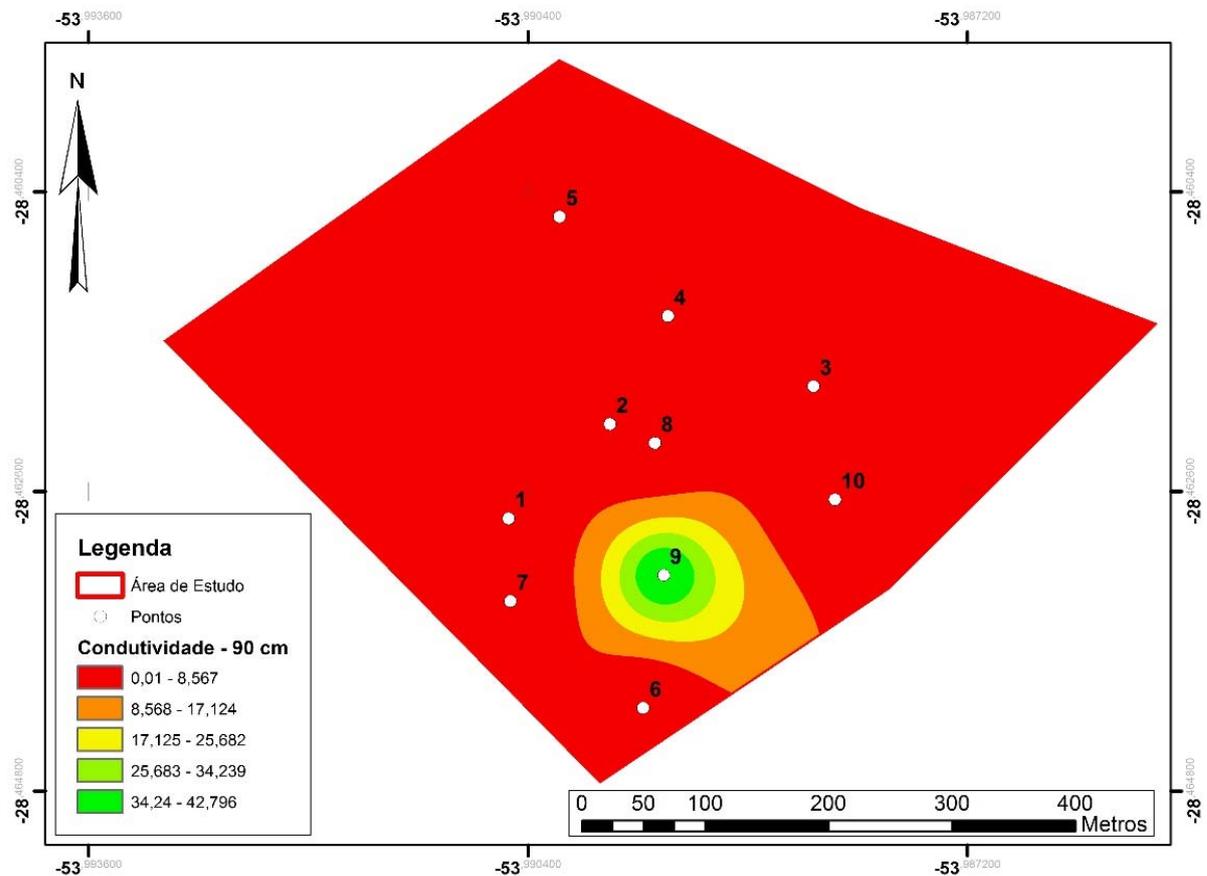
Figura 14 - Condutividade hidráulica saturada do latossolo vermelho distroférico típico da área experimental, para a profundidade de 60 cm.



Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

Na profundidade de 90 cm do solo com rotação de culturas, observou-se K_0 médio de $8,77 \text{ mm h}^{-1}$, enquanto que na área de ervais a média foi inferior a 1 mm h^{-1} (Figura 15). Na unidade experimental 9, em 90 cm, a média de K_0 foi de $9,81 \text{ mm h}^{-1}$. Atribuiu-se os altos resultados obtidos de K_0 a existência de uma característica unicamente constatada visualmente na unidade 9, isto é, a existência de poros tubulares dendríticos.

Figura 15 - Condutividade hidráulica saturada do latossolo vermelho distroférico típico da área experimental, para a profundidade de 90 cm.



Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

Esse tipo de poro distribui-se tal como seriam as raízes de plantas, ou seja, sob forma ramificada. Em função da lenta condutividade hidráulica da matriz de argila do solo, a percolação da água através das camadas de solo insaturado ocorre em caminhos preferenciais, incluindo túneis criados pela macrofauna, condutas de raízes das plantas, fissuras de retração e macroporos distribuídos conforme as partículas minerais do solo (ALAKUKKU et al., 2010; BOUMA et al., 1977; BRONSWIJK; HAMMINGA; OOSTINDIE, 1995; BEVEN; GERMANN, 1982; JARVIS, 2007).

Uma característica importante do fluxo preferencial é a natureza de não-equilíbrio de fluxo (WARSTA et al., 2013). Ou seja, a água, movendo-se rapidamente nos macroporos, não tem tempo para equilibrar-se lentamente no restante da matriz do solo (ŠIMÚNEK, et al., 2003). Sendo assim, os poros dendríticos exerceu múltiplos caminhos preferenciais de água na região da unidade experimental 9, aumentando a

quantidade de conexões porosas, o que incrementou muito a condutividade hidráulica saturada.

Nesse caso, a lateralidade de fluxo sub-superficial tenda a transmitir água apenas em direção à unidade experimental, dada sua cota de 84m. Todavia, num evento duradouro de precipitação pluvial sobre a área de estudo, essas características podem provocar lenta atividade de fluxo, induzindo o movimento ascendente de água da 90 cm para 60 cm, gerando fluxos laterais sub-superficiais. Ainda, diante do exposto e do objetivo proposto, pode-se inferir que essa região exerce a função de facilitar o armazenamento de água em profundidades maiores que 90 cm, e também contribui mais que as outras unidades experimentais para a drenagem profunda.

7. CONCLUSÃO

Nesta pesquisa, a topografia mostra que as formas de vertente governam propriedade físico-hídricas e o padrão de escoamento até no máximo 30 cm de profundidade. As variações de ângulo e a posição da vertente controlam a capacidade do solo de conduzir a água, infiltrar no perfil, e transportar sedimentos. Uma parte do fluxo de escoamento superficial tende a ser retido na área de ervais, que exerce resistência ao movimento da água, favorecido também pela integração de poros texturais e bioporos.

Nas profundidades maiores, 60 e 90 cm, atribui-se as distinções das propriedades físico-hídricas à natureza coloidal do solo. O elevado percentual de argila e os microagregados não sofrem efeito do uso, mas modificam o tamanho e a distribuição dos poros, que reduz a condutividade hidráulica saturada em toda a área experimental. Logo, o Latossolo de estudo é propenso a geração de fluxo lateral sub-superficial.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. L. **Propriedades hídricas e mecânicas afetadas por sistemas de manejo e variabilidade espacial de um Argissolo**. 2000. 65 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- ALI, M. et al. Regionalization of subsurface stormflow parameters of hydrologic models: Up-scaling from physically based numerical simulations at hillslope scale. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 683-698, 2014.
- ALAKUKKU, L. et al. Soil macroporosity in relation to subsurface drain location on a sloping clay field in humid conditions. **Soil Tillage Research**, v.106, p. 275–284.
- ALVARENGA, C. C. et al. Continuidade espacial da condutividade hidráulica do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 35, p. 1745-1757, 2011.
- ALVES, M. C.; SUZUKI, E. A. S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 26, p. 27-34, 2004.
- ANDRADE, R. da S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 382-388, 2009.
- ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 24, p. 857-865, 2000.
- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um latossolo vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 337-345, 2004.
- ARAÚJO-JUNIOR et al. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 115-131, 2011.
- ARAÚJO, Q. R. et al. Alterações nas propriedades físicas de um podzólico vermelho-amarelo da região cacauzeira da Bahia, sob diferentes coberturas vegetais. **Agrotropica**, v. 10, p. 69-78, 1998.
- ASHBURNER, J. E.; SIMS, B. G. **Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza**. San José: IICA, 1984. 474 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Execução de levantamento topográfico**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994. 35 p.

BARROS, K. R. M., et al. Distribuição da porosidade textural e estrutural em solos de Terra Preta Arqueológica. **Ciência Agronômica**, v. 47, p. 609-615, 2016.

BATISTA, M. de A.; PAIVA, D. W.; MARCOLINO, A. **Solos para todos: perguntas e respostas**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2014. 87 p.

BATHKE, G.; CASSEL, D. Anisotropic variation of profile characteristics and saturated hydraulic conductivity in an ultisol landscape. **Soil Science Society American Journal**, v. 55, p. 333-339, 1991.

BAVOSO, M. A. et al. Preparo do solo em áreas de produção de grãos, silagem e pastejo: efeito na resistência tênsil e friabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 227-234, 2010.

BELTRAME, L. F. de S. (coord.). **Consistência de Dados Hidrológicos da Bacia Hidrográfica do Alto Uruguai, Sub-Bacia 75**. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, 2000.

BENGOUGH, A. G.; MULLINS C. E. Penetrometer resistance, root penetration resistance and root elongation rate in two sandy loam soils. **Plant and Soil**, v. 131, p. 59-66. 1991.

BEVEN, K., GERMANN, P. Macropores and water flow in soils. **Water Resources Research**, v. 18, p. 1311-1325. 1982.

BERGAMIN, A. C. et al. Compactação em um Latossolo Vermelho Distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 681-691, 2010.

BERTONI, J.; LOMBARDI, N. F. **Conservação do solo**. 4. ed. São Paulo: Ícone, 1999.

BEUTLER, A. N. Densidade relativa ótima de latossolos vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 843-849, 2005.

BEUTLER, A. N. et al. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 167-177, 2001.

BEUTLER, A. N. et al. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 829-834, 2002.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Bulletin of Hydrological Sciences**, v. 24, p. 43-69, 1979.

BLAINSKI, E. et al., Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 32, p. 975-983, 2008.

BLOOM, A. L. **Superfície da terra**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

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

BOUMA, J. Hydrology and soil genesis of soils with aquic moisture regimes. In: WILDING, L. P. et al. **Pedogenesis and soil taxonomy: Concepts and interactions**. Amsterdam: Elsevier, 1983. p. 253-281.

BOUMA, J.; JONGMANS, A.; STEIN, A. Characterizing spatially variable hydraulic properties of a boulder clay deposit in the Netherlands. **Geoderma**, v. 45, p. 19-29, 1989.

BOUMA, J. The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons. **Soil Science Society American Journal**, v. 41, p. 945-950, 1977.

BOUYOUCOS, G. J. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. **Agronomy Journal**, v. 54, p. 464-465, 1962.

BLAKE, C. R. **Methods of Soil Analysis: Part 1 – Physical and Mineralogical Methods**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. 255 p.

BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 318p.

BRONSWIJK, J. J. B., HAMMINGA, W., OOSTINDIE, K., 1995. Field-scale solute transport in a heavy clay soil. *Water Resour. Res.* 31, 517-526.

BRUBAKER, S. C. et al. Soil properties associated with landscape positions. **Soil Science Society of American Journal**, v. 57, p. 235-239, 1993.

BURIOL, G. A. Balanço Hídrico. In: RIGHES, A. A., BURIOL, G. A., BOER, N. **Água e educação: princípios e estratégias de uso e conservação**. Santa Maria: Centro Universitário Franciscano, 2009. p. 109-136.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. **Circular técnica**, Piracicaba, n. 16, 1997, 132 p.

CAMPOS, C. E. B. et al., Indicadores de campos para solos hidromórficos na região Viçosa (MG). **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 27, p. 1057-1066, 2003.

CARDOSO, L. E. et al. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no pantanal sul-mato-grossense. **Revista Brasileira Ciência do Solo**. v. 35, p. 613-622, 2011.

CARDUCCI, C. E. **Retenção de água e capacidade de suporte de carga de latossolos da região do cerrado**. 2010. 125 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

CARDUCCI, C. E. et al. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo de van Genuchten, **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 35, p. 77-86, 2011.

CARMO, D. A. B. do. **Cor do solo na caracterização de áreas específicas de manejo para a cultura do café**. 2014. 62 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, São Paulo, 2014.

CARNEIRO, M. A. C. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 33, p. 147-157, 2009.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372 p.

CASTIONE, G. A. F. et al. Variabilidade espacial da textura do solo em área irrigada por pivô central em diferentes posições na paisagem. **Revista Agroambiente**, v. 9, p. 2019-226, 2015.

CASTRO, O. M.; VIEIRA, S. R. Condutividade hidráulica de um Latossolo roxo, sob três sistemas de manejo. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Águas de Lindóia/SP. **Anais...** Águas de Lindóia/SP: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. CD-ROM.

CASTRO, S. S. de. **Micromorfologia de Solos**: Bases para descrição de lâminas delgadas. 2. ed. Goiânia: Universidade Estadual de Campinas, 2008. 143 p.

CAVENAGE, A. et al. Alterações nas propriedades físicas de um latossolo vermelho-escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 997-1003, 1999.

CHAGAS, C. da S. et al. Atributos topográficos e dados do Landsat7 no mapeamento digital de solos com uso de redes neurais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 497-507, 2010.

CHEVALLIER, P. **As precipitações na região de Cruz Alta e Ijuí (RS - Brasil)**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. (Recursos Hídricos. Publicação n. 24). 1991.

CHRISTOFOLETTI, A. A. Análise de Bacias Hidrográficas. In: CHRISTOFOLETTI, A. A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1980. 102-121p.

COLLARES, G. L. et al. Compactação superficial de Latossolos sob integração lavoura: pecuária de leite no noroeste do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 41, p. 246-250, 2011.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B nítico. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 29, p. 581-595, 2005.

CORÁ, J. E. et al. Adição de areia para dispersão de solos na análise granulométrica. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 33, p. 255-262, 2009.

CUNHA, T. J. F. et al. Impacto do manejo convencional sobre propriedades físicas e substâncias húmicas de solos sob Cerrado. **Ciência Rural**, v. 1, p. 27-36, 2001.

CURI, N.; RESENDE, M.; SANTANA, D. P. Solos de várzea de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, v. 13, p. 1-10, 1989.

CURMI, P.; KERTTZMAN, F. F.; QUEIROZ NETO, J. P. Degradation of structure and hydraulic properties in an Oxisol under cultivation (Brazil). **Developments in Soil Science**, v. 22, p. 569-579, 1994.

CURTIS, R. O.; POST, B. W. Estimating bulk density from organic matter content in some Vermont forest soils. **Soil Science Society American Proceedings**, v. 28, p. 285-286, 1964.

DANIELS, R. B. et al. Relations between soil morphology and water-table levels on a dissected North Carolina Coastal Plain Surface. **Soil Science Society of American Journal**, v. 35, p. 781-784. 1971.

DARZI-NAFTCHALI, A. et al., Effect of subsurface drainage on water balance and water table in poorly drained paddy fields. **Agricultural Water Management**, v. 130, p. 61-68, 2013.

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; DIAS, H. S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 23, p. 703-709, 1999.

DEMATTE, J. L. I.; HOLOWAYCHUCK, N. Solos da região de São Pedro, estado de São de Paulo. Propriedades granulométricas e químicas. **Revista Brasileira Ciência do Solo** v. 1, p. 92-98, 1977a.

DEXTER, A. R. et al. Complexed organic matter controls soil physical properties. **Geoderma**, v. 144, p. 620-627, 2008b.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v.120, p. 201-214. 2004.

DEXTER, A. R.; YOUNGS, I. M. Soil physic toward 2000. **Soil e Tillage Reseach**, v. 24, p. 101-106, 1992.

DEXTER, A. R.; WATTS, C. Tensile strength and friability. In: SMITH, K.; MULLINS, C. **Soil and environmental analysis, physical methods**. 2.ed. New York, Marcel Dekker, 2000. p. 401-430.

DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo. **Tópicos em ciência do solo**, v. 1. p. 55-94, 2000.

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

DIEMER, F. et al. Propriedades geotécnicas do solo residual de basalto da região de Ijuí/RS. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 12, p. 25-36, 2008.

DIEMER, F. et al. Estudo da permeabilidade do solo da região de Ijuí-RS percolando água e óleo diesel. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.16, p. 29-41, 2010.

DORAN, J. W.; PARIKN, T. B. Defining and accessing soil quality. In: DORAN, J. W. et al. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA, 1994. p. 1-20.

DORAN, J. W. Soil quality na sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, 1997, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD-ROM.

DUARTE, M. N. et al. Mineralogia, química e micromorfologia de solos de uma microbacia nos tabuleiros costeiros do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1237-1250, 2000.

ELLIES, A.; GREZ, R.; RAMIREZ, C. La conductividad hidráulica em fase saturada como herramienta par el diagnostico de la estructura del suelo. **Agro Sur**, v. 5, p. 51-56, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10., 1979, Rio de Janeiro. **Súmula...** Rio de Janeiro, 1979. 83 p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 2006. 306p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja na região central do Brasil**. Disponível em: < <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Soja/SojaCentralBrasil2003/manejo.htm>>. Acesso em: 02 set. 2016.

FANTAW, Y.; LEDIN, S.; ABDU, A. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by topographic aspects and vegetation in the Bale Mountains Ethiopia. **Geoderma**, v. 135, p. 335-344.

FARIA, S. M.; FRANCO, A. A. Espécies de leguminosas fixadoras de nitrogênio para revegetação de áreas degradadas. In: SIMPÓSIO SUL-AMERICANO, 1. SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 2., Curitiba, 1994. **Anais...** Curitiba, UFPR / Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná 1994. p. 481-489.

FERNANDES, B. F. **Efeito do teor de água na avaliação da compactação do Solo causada pelo tráfego agrícola e seu reflexo nos atributos físicos do solo.** 2015. 111 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista de Júlio de Mesquita Filho, São Paulo, 2015.

FERRARESI, T. M. Espectroscopia de infravermelho na determinação da textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1769-1777, 2012.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia (UFLA)**, v. 35, p. 1039-1042, 2011.

FIORI, A. Old water contribution to streamflow: insight from a linear Boussinesq model. **Water Resources Research**, v. 48, p. 1-6, 2012.

FIORIN, J. E.; REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A. Armazenamento de água no solo e produtividade da cultura do milho em solo Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 249-255, 1997.

FREITAS, P. L. de. Manejo Físico do Solo. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO NO CERRADO, 1, 1990, Goiânia, GO. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1992. p. 117-139.

FU, P.; RICH, P. M. Design and implementation of the solar analyst. An arcview extension for modeling solar radiation at landscape scales. In: **International User Conference Proceedings**. San Diego: ESRI, 1999.

GALLANT, J. C.; WILSON, J. P. Primary topographic attributes. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. **Terrain Analysis: Principles e applications**. New York: John Willey, 2000, p. 51-85.

GENRO JUNIOR, S. A. et al. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, v. 39, p. 65-73, 2009.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo Argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 477-484, 2004.

GHIBERTO, P. J. **Lixiviação do nitrogênio e enxofre em um Latossolo cultivado com cana de açúcar.** 2009. 158 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade de São Paulo. 2009.

GOLDENFUM, J. A. Pequenas bacias hidrológicas: conceitos básicos. In: PAIVA, J. B. D. (org.); PAIVA, E. M. C. D. (org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas**

bacias hidrográficas. Porto Alegre, RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001. p. 2-13.

GONÇALVES, A. D. M. de A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1174-1184, 2013.

GONÇALVES, F. C. **Análise micromorfológica e relação com atributos de um solo sob diferentes usos e manejos.** 2011. 110 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de São Paulo. 2011.

GUPTA, S. C.; LARSON, W. E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. **Water Resources Research**, v. 15, p. 1633-1635, 1979.

GRAHAM, R. C.; O'GEEN, A. T. Soil mineralogy trends in California landscapes. **Geoderma**, v. 154, p. 418-437, 2010.

GUERIF, J. L'analyse de la porosité: application à l'étude du compactage des sols. In: MONIER, G.; GROSS, M. J. **Soil compaction and regeneration.** Rotterdam: CEE, 1987. p. 122-131.

GUERRA, A. J. T., SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e Conservação dos Solos:** Conceitos, temas e aplicações. 4. ed. Bertrand, 1999. 340 p.

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

HATANO, R. et al. Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 34, p. 535-546, 1988.

HELPER, F. **Demandas e disponibilidades hídricas da bacia hidrográfica do rio Pardo (RS) nos cenários atual e futuro para diferentes sistemas de produção de arroz irrigado.** 2006. 249 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

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

HARTGE, R. H.; ELLIES, A. El rol de la física del suelo en la producción agrícola. **Agro Sur**, v. 27, p. 43-56, 1999.

HILLEL, D. **Solo e água:** fenômenos e princípios físicos. Porto Alegre: Universidade do Rio Grande do Sul, 1970. 231 p.

HILLEL, D. **Soil and water:** physical principles and process. 3 ed. New York: Academic Press, 1973. 288 p.

HORN, R. et al. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil Tillage Research**, v. 35, p. 23-36, 1995.

IJIMA M.; KONO, Y. Development of Golgi apparatus in the root cap cells of maize (*Zea mays* L.) as affected by compacted soil. **Annals of Botany**, v. 70, p. 207-212. 1992

ILEK, A.; KUCZA, J. A laboratory method to determine the hydraulic conductivity of mountain forest soils using undisturbed soil samples. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 1649-1659, 2014.

INGARAMO, O. E. **Indicadores físicos de la degradación del suelo**. 2003. 298 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade da Coruña, La Coruña, 2003.

KERTZMANN, F. F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocadas pela compactação**. 1996. 153 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

JARVIS, N. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. **European Journal Soil Science**, v. 58, p. 523–546, 2007.

JULIÀ, M. F. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. **Geoderma**, v. 123, p. 257-277, 2004.

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

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. et al. **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 499-510.

KERTZMANN, F. F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocadas pela compactação**. 1996. 153 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia**. São Paulo: Ceres, 1979. 264 p.

KLEIN, V. A. Densidade dos sólidos do solo. In: KLEIN, V. A. **Física do solo**. 3. ed. Passo Fundo: UPF, 2014. p. 33-39.

KLEIN, V. A. et al. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, v. 40, p. 1550-1556, 2010.

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

- LEÃO, M. G. A. et al. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo sob cultivo de citros. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, p. 121-131, 2010.
- LEÃO, M. G. A. et al. Terrain forms and spatial variability of soil properties in an area cultivated with citrus. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 644-651, 2011
- LEMOS, R. C. de; SANTOS, R. D. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1984. 46 p.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005. 335 p.
- LICHTENBERG, E.; SHAPIRO, L. K. Agriculture and nitrate concentrations in Maryland Community water system wells. **Journal Environmental Quality**, v. 26, p. 145-153, 1997.
- LIMA, H. V. de. et al. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 677-684, 2005.
- LUXMOORE, R. J. Micro-meso and macroporosity of soil. **Soil Science Society of American Journal**, v. 45, p. 671-672, 1981.
- MACHADO, J. L. et al. Inter-relações entre as propriedades físicas e os Coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 495- 502, 2008.
- MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, p. 349-354, 2011.
- MAZURANA, M. et al. Sistemas de preparo de solo: Alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1197-1206, 2011.
- McDANIEL, P. et al. Secondary manganese/iron ratios as pedochemical indicators of field-scale throughflow water movement. **Soil Science Society of American Journal**. v. 56, p. 1211-1217, 1992.
- McDANIEL, P. et al. Perched water tables on argixeroll and fragixeralf hillslopes. **Soil Science Society of American Journal**, v. 65, p. 805-810, 2001
- McDANIEL, P.; FALEN, A. Temporal and spatial patterns of episaturation in a fragixeralf landscape. **Soil Science Society of American Journal**, v. 58, p. 1451-1457, 1994.
- MACMILLAN, R. A. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 113, p. 81-109, 2000.

MERMUT, A. R.; GREVERS, M. C. J.; DE JONG, E. Evaluation of pores under different management systems by image analysis of clay soils in Saskatchewan, Canada. **Geoderma**, v. 53, p. 357-372, 1992.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental. **Ciência Rural**, v. 42, p. 1575-1582, 2012.

MION, R. L. et al. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo amarelo. **Semina**, v. 33, p. 2057-2066, 2012.

MOORE, I. D. et al. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. **Transactions of the ASAE**, v. 31, p. 1098-1107, 1988.

MOORE, I. D. et al. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 3-30, 1991.

MOREIRA, W. H. et al. Atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 389-400, 2012.

MÜLLER, M. M. L. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 531-538, 2001.

MOTA, S. da M. et al. Qualidade e atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico Típico em diferentes sistemas de manejo. **Revista Agrarian**, v. 4, p.105-112, 2011.

MUNSELL, A. H. **A color notation**. Baltimore: G. H. Ellis Co, 1905. 89 p.

MUNSELL, A. H. **Munsell soil color charts**. New York: GretagMacbeth, 2009.

MUZILLI, O. O plantio direto com alternativa no manejo e conservação do solo. In: **Curso básico para instrutores e manejo e conservação do solo**. Londrina: IAPAR, 1991. 20 p.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1989. 422 p.

OLIVEIRA, G. C. et al. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 28, p. 327-336, 2004.

OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; MELLO, C. R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 265-270, 2007.

- OLIVEIRA, J. O. A. P. et al. Influência de sistemas de preparo do solo na produtividade da mandioca (*Manihot esculenta*, Crantz). **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 25, p. 443-450, 2001.
- ORTIGARA, C. et al. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 619-628, 2014.
- OVALLES, F.; REY, J. Variabilidad interna de unidades de fertilidad en suelos de la depresión del Lago de Valencia. **Agronomia Tropical**, v. 44, p. 41-65, 1994.
- PANAYITOPOULOS, K. P.; PAPADOPOULOU, C. P.; HATJIOANNIDOU, A. Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings. **Soil Tillage Research**, v. 31, p. 323-337, 1994.
- PEREIRA, M. A. F.; KOBIYAMA, M.; CASTRO, N. M. dos R. Relação entre a geometria hidráulica e a curva de permanência em estações fluviométricas da bacia hidrográfica do Ijuí – RS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, p. 443-454, 2014.
- PICKERING, E. W.; VENEMAN P. L. M. Moisture regimes and morphological characteristics in a hydrosequence in Central Massa chusetts. **Soil Science Society American Journal**, v. 48, p. 113–118, 1984.
- PISTOCCHI, A.; BITTELLI M. A Simplified Parameterization of the Monthly Topsoil Water Budget. **Water Resources Research**, v. 44, p. 1-21, 2008.
- QUEIROZ, A. T.; BARBOSA, G. R.; ZANZARINI, R. M.; ALBINO, K. A.; MENDES, P. C. Caracterização da distribuição pluviométrica do Rio Tijuco. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13., 2009, Cuiabá, **Anais...** Cuiabá, 2009.
- RAGHAVAN, G. S. V.; ALVO, P.; MCKYES, E. Soil compaction in agriculture: a view toward managing the problem. **Advances in Soil Science**, v. 11, p. 1-35, 1990.
- RANZANI, G. Análise mecânica de solos pelo método de Bouyoucos modificado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 5., 1955, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1959. p.18-31
- RAWLS, W. J.; GISH, T. J.; BRAKENSIEK, D. L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advances in Soil Science**, v. 16, p. 213-234, 1991.
- RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. 2003. 158 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedade físicas do solo**. Santa Maria: UFSM, CCR, 2006. 18 p.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceito, processo e aplicações**. Barueri: Manole, 2004.

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

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Ciências Agrárias**, v. 26, p. 321-344, 2005.

RIGHES, A. A. Água no planeta: características, disponibilidade e ciclo hidrológico. In: RIGHES, A. A., BURIOL, G. A., BOER, N. **Água e educação: princípios e estratégias de uso e conservação**. Santa Maria: Centro Universitário Franciscano, 2009. p. 17-48.

RIGHES, A. A. et al. Mulching vertical e enxurrada no plantio direto da soja. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. CD-ROM.

RIGHES, A. A.; SILVA, R. F. Escoamento superficial, erosão e contaminação do solo. In: RIGHES, A. A.; BURIOL, G. A.; BOER, N. **Água e educação: princípios e estratégias de uso e conservação**. Santa Maria: Centro Universitário Franciscano, 2009. p. 137-168.

RINGROSE-VOASE, A. J. A scheme for the quantitative description of soil macrostructure by image analysis. **Journal of Soil Science**, v. 38, p. 343-356, 1987.

RINGROSE-VOASE, A. J. Micromorphology of soil structure: description, quantification, application. **Australian Journal of Soil Research**, v. 29, p. 777-813, 1991.

RUIZ, H. A. Incrementos da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 297-300, 2005.

SANCHES, A. C. et al. Impacto do cultivo de citros em propriedades químicas, densidade do solo e atividade microbiana de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 91-99, 1999.

SANCHES, R. B. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, v. 68, n. 2. p. 1095-1103, 2009.

SANTANA, O. A. et al. Relação entre o índice de avermelhamento do solo e o estoque de carbono na biomassa aérea da vegetação de cerrado. **Ciência Florestal**, v. 23, p. 783-794, 2013.

SCHWABE, M. **Formação do solo do município de Ijuí e problemas decorrentes do manejo**. 1987. 79 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em

Agronomia). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS, 1987.

SCHOENEGER, P. J. et al. **Field Book for describing and sampling soils**. Lincoln: Natural Resources Conservation Service, 1998. 182 p.

SECCO, D. et al. Propriedade da soja e propriedades física de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 797-804, 2004.

SERVADIO, P. et al. Effect on some clay soil qualities following the passage of rubbertracked and wheeled tractors in central Italy. **Soil and Tillage Research**, v. 61, p. 143-155, 2001.

SEVERIANO, E. C. **Alterações estruturais de Latossolos representativos da região do cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2010. 148 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SIDLE, R. C. Stormflow generation in steep forested headwaters: a linked hydrogeomorphic paradigm. **Hydrological Processes**, v. 14, p. 369–385, 2000.

SIRTOLI, A. E. et al. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com o solo. **Scientia Agraria**, v. 9, p. 317-329, 2008.

SILVA, C. L. da; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, p. 213-220, 1997.

SILVA, F. R.; RIGHES, A. A. Técnicas de infiltração e conservação de água no solo. In: RIGHES, A. A.; BURIOL, G. A.; BOER, N. **Água e educação: princípios e estratégias de uso e conservação**. Santa Maria: Centro Universitário Franciscano, 2009. p. 169-197.

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

SILVA JUNIOR, J. F. et al. Classificação numérica e modelo digital de elevação na caracterização espacial de atributos dos solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 415–424, 2012.

SILVA, M. B. et al. Estudo de topossequência da baixada litorânea Fluminense: efeitos do material de origem e posição topográfica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 965-976, 2001.

SILVA, R. B. et al. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídras e mecânicas de um latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 973-983, 2003.

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. Sistemas de preparo do solo e rotação de culturas na produtividade de milho, soja e trigo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, p. 240-244, 2003.

ŠIMÚNEK, J. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. **Journal of Hydrology**, v. 272, p. 14–35, 2003.

SOLÉ-BENET, A. et al. Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related process in badlands from Tabernas (SE Spain). **Catena**, v. 31, p. 23- 38, 1997.

SOPCHACKI, C. H.; SAMPAIO, T. V. M. Estudo de metodologias para identificação de formas de vertentes na bacia do rio Curralinho – região metropolitana de Curitiba/PR. **Revista Geografar**, v. 8, p. 100-124, 2013.

SOUZA, C. K. et al. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um latossolo de Jaboticabal, (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 1067-1074.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 699-707, 2001.

SPEIDEL, D. H.; RUEDISILI, L. C.; AGNEW, A. F. **Perspectives on water: uses and abuses**. New York: Oxford University Press, 1988. 388 p.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.395-401, 2001.

SWAROWSKY, A. **Linking soil stratigraphy and catchment hydrology in a semi-arid oak woodland in the Sierra Nevada Foothills, California**. 2010. 153 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – California University, Davis, California, 2010.

SWAROWSKY, A.; DAHLGREN, R. A.; O'GEEN, A. T. Linking Subsurface Lateral Flowpath Activity with Streamflow Characteristics in a Semiarid Headwater Catchment. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, p. 532-547, 2012.

SWAROWSKY, A. et al. Catchment-Scale Soil Water Dynamics in a Mediterranean-Type Oak Woodland. **Vadose Zone Journal**, v. 10, p. 800-815, 2011.

TEIXEIRA, W. G. **Land use effects on Soil Physical and Hydraulic Properties of a Clayey Ferralsol in the Central Amazon**. 2001. 255 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - University of Bayreuth. Bayreuth, Alemanha. 2001.

TORMENA, C. A. et al. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 943-952, 2008.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58 p.

UHLAND, R. E. Physical properties of soil as modified by crops and management. **Soil Science Society of American Proceeding**, v. 14, p. 361-366, 1949.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. **Manual de dissertações e teses da UFSM: estrutura e apresentação**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2015. 88 p.

VALERIANO, M. M. **Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos: INPE, 2008a.

VANDENBYGAART, A. J. et al. Tillage system effects on near-surface soil morphology: Observations from the landscape to microscale in silt loam soils of southwestern Ontario. **Soil Tillage Research**, v. 51, p. 139-149, 1999.

VELOSO, A. J. G. Importância do Estudo das Vertentes. **GEOgraphia**. v. 8, p. 1-5, 2002.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma revisão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**. v. 33, p. 743-755, 2009.

VIEIRA, C. P. **Sistemas de Manejo do Solo, Culturas de Cobertura e Rotação de Culturas: Resposta para Soja e Milho**. 2009. 79 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2009.

VIZZOTO, V. R.; MARCHEZAN, E.; SEGABINAZZI, T. Efeito do pisoteio bovino em algumas propriedades físicas do solo de várzea. **Ciência Rural**, v. 30, p. 965-969, 2000.

VOLLANT-TUDURI, N. et al. Mass proportion of microaggregates and bulk density in a Brazilian clayey oxisol. **Soil Science Society of American Journal**, v. 69, p. 1559-1564, 2005.

WARSTA, L. et al. Simulation of water balance in a clayey, subsurface drained agricultural field with three-dimensional FLUSH model. **Journal of Hydrology**, v. 476, p. 395-409, 2013.

WATTS, C. W.; DEXTER, A. R. Soil friability: Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal Soil Science**, v. 49, p. 73-84, 1998.

WEBER, L. et al. Cultivares de arroz irrigado e nutrientes na água de drenagem em diferentes sistemas de cultivos. **Ciência Rural**, v. 33, p. 27-33, 2003.

WEI, E. C.; McGUINNESS, J. L. **Reciprocal distance squared method: a computer technique for estimating areal precipitation**. Illinois: Agricultural Research Service, 1973. 29 p.

YOUNG, A. **Slopes**. Londres: Logman, 1972, 201-204 p.

ANEXO A – DADOS DA FRAÇÃO AREIA

Tabela 2 - Fração areia das unidades experimentais da área de estudo.

Sistema de Manejo	Unidade Experimental	Profundidade (cm)	Areia (%)				
			Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Média	Desvio Padrão
Sistema de Cultivo por Ervais	1	30	49,7	51,4	61,3	54,13	6,23
		60	32,3	35,5	48,9	38,87	8,81
		90	42,3	52,2	38,9	44,47	6,92
	2	30	45,7	49,7	41,6	45,68	4,05
		60	52,6	55,9	44,9	51,14	5,65
		90	39,0	35,2	43,4	39,19	4,10
	3	30	40,8	52,6	44,4	45,91	6,02
		60	24,1	30,9	20,9	25,28	5,11
		90	27,6	24,4	34,1	28,74	4,95
	4	30	40,4	40,0	34,1	38,16	3,50
		60	43,9	42,3	43,8	43,36	0,90
		90	55,6	60,4	58,6	58,20	2,38
	5	30	26,2	23,0	13,0	20,76	6,88
		60	19,5	13,0	11,3	14,60	4,37
		90	2,6	3,8	8,9	5,11	3,34
Sistema Plantio	6	30	6,0	4,7	15,2	8,63	5,71
		60	16,2	6,3	19,7	14,04	6,96
		90	13,1	3,1	13,1	9,74	5,77
	7	30	46,9	46,9	46,9	46,90	0,04
		60	37,3	33,4	38,5	38,39	2,69
		90	39,1	41,1	38,2	39,46	1,52
	8	30	39,2	43,1	39,8	40,70	2,14
		60	29,8	29,9	33,1	30,94	1,90
		90	39,6	33,2	31,5	34,76	4,27
	9	30	28,1	30,2	26,4	28,21	1,89
		60	32,1	37,1	30,5	33,23	3,47
		90	33,1	26,4	29,7	29,74	3,33
	10	30	18,9	20,4	15,3	18,20	2,61
		60	15,6	17,3	19,0	17,30	1,70
		90	19,1	19,1	19,1	19,09	0,04

Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

ANEXO B – DADOS DA FRAÇÃO SILTE

Tabela 3 - Fração silte das unidades experimentais da área de estudo.

Sistema de Manejo	Unidade Experimental	Profundidade (cm)	Silte (%)				
			Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Média	Desvio Padrão
Sistema de Cultivo por Ervais	1	30	27,2	27,6	5,9	20,26	12,41
		60	14,1	14,3	7,5	11,97	3,85
		90	6,7	9,3	12,5	9,47	2,90
	2	30	12,3	15,7	5,1	11,07	5,40
		60	22,6	26,4	5,0	18,02	11,44
		90	17,8	9,6	4,1	10,50	6,89
	3	30	7,8	17,7	17,7	14,39	5,69
		60	7,6	14,1	6,1	9,27	4,27
		90	12,7	13,2	17,2	14,36	2,50
	4	30	29,5	32,7	31,1	31,08	1,59
		60	16,8	12,1	10,4	13,09	3,34
		90	20,6	17,2	20,4	19,42	1,95
	5	30	17,3	17,2	18,8	17,77	0,92
		60	14,0	12,5	10,9	12,46	1,56
		90	33,7	24,9	25,0	27,86	5,04
Sistema Plantio	6	30	30,9	39,2	26,1	32,07	6,63
		60	30,7	37,0	28,7	32,15	4,35
		90	21,4	24,6	21,3	22,43	1,90

(Conclusão)

	30	23,0	23,5	21,7	22,72	0,89
7	60	24,9	24,8	24,5	24,74	0,22
	90	18,9	20,3	22,0	20,42	1,56
	30	28,2	30,1	25,1	27,79	2,49
8	60	17,8	17,5	19,0	18,11	0,77
	90	13,9	13,5	17,5	14,97	2,16
	30	13,3	10,0	16,7	13,33	3,33
9	60	10,7	17,4	14,1	14,05	3,33
	90	30,8	30,8	39,1	33,57	4,81
	30	35,4	35,4	33,7	34,83	0,98
10	60	32,0	37,0	35,2	34,76	2,53
	90	27,2	27,6	5,9	20,26	12,41

Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

ANEXO C – DADOS DA FRAÇÃO ARGILA

Tabela 4 - Fração argila das unidades experimentais da área de estudo.

Sistema de Manejo	Unidade Experimental	Profundidade (cm)	Argila (%)				
			Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Média	Desvio Padrão
Sistema de Cultivo por Ervais	1	30	30,3	37,0	25,5	30,94	5,78
		60	40,5	36,9	45,2	40,87	4,14
		90	43,5	33,5	53,6	43,55	10,04
	2	30	47,7	41,0	45,9	44,85	3,46
		60	35,0	28,4	50,0	37,79	11,06
		90	38,4	38,4	51,6	42,79	7,66
	3	30	41,4	37,9	51,5	43,59	7,08
		60	68,1	51,4	61,4	60,33	8,39
		90	64,8	61,4	59,8	61,99	2,55
	4	30	47,0	46,8	48,6	47,47	1,01
		60	26,6	25,0	25,1	25,57	0,90
		90	27,6	27,6	31,0	28,71	2,01
	5	30	53,1	59,8	66,5	59,83	6,70
		60	63,1	69,9	69,9	67,63	3,89
		90	83,4	83,6	80,2	82,43	1,91
Sistema Plantio Direto	6	30	60,3	77,4	59,8	65,84	10,02
		60	52,9	54,5	54,3	53,89	0,89
		90	56,2	59,9	58,2	58,12	1,85
	7	30	31,8	28,4	31,8	30,67	1,92
		60	39,8	43,2	39,8	40,90	1,97
		90	36,0	34,1	37,4	35,81	1,64
	8	30	41,9	36,5	38,2	38,88	2,78
		60	42,0	40,1	41,7	41,27	1,06
		90	42,6	49,3	49,5	47,13	3,93
	9	30	58,0	56,3	56,1	56,81	1,05
		60	54,5	52,9	52,9	53,43	0,96
		90	57,5	53,6	51,2	54,11	3,18
	10	30	50,3	48,8	45,6	48,23	2,41
		60	49,0	47,3	47,3	47,87	0,96
		90	48,9	43,9	45,6	46,15	2,54

Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

ANEXO D – DADOS DE DENSIDADE DO SOLO

Tabela 5 – Densidade do solo nas unidades experimentais da área de estudo.

Sistema de Manejo	Unidade Experimental	Profundidade (cm)	Densidade do Solo (g cm ⁻³)				
			Repetições				
1	2	3	4	5			

Sistema de Cultivo por Ervais	1	30	1,03	1,29	1,23	1,44	1,70	1,34	0,25
		60	1,48	1,30	1,35	1,65	1,41	1,44	0,14
		90	1,29	1,56	1,25	1,22	1,63	1,39	0,19
	2	30	1,51	1,34	1,69	1,62	1,55	1,54	0,13
		60	1,17	1,14	1,17	1,09	1,11	1,13	0,04
		90	1,16	1,18	1,16	1,14	1,13	1,15	0,02
	3	30	1,41	1,22	1,12	1,33	1,21	1,26	0,11
		60	1,30	1,32	1,32	1,25	1,38	1,31	0,05
		90	1,41	1,23	1,33	1,40	1,33	1,34	0,07
	4	30	1,26	1,39	1,42	1,36	1,39	1,36	0,06
		60	1,35	1,47	1,17	1,35	1,39	1,35	0,11
		90	1,12	1,30	1,14	1,09	1,09	1,15	0,09
	5	30	1,30	1,30	1,27	1,37	1,33	1,32	0,04
		60	1,37	1,36	1,41	1,34	1,37	1,37	0,02
		90	1,24	1,18	1,28	1,29	1,33	1,26	0,06
Sistema Plantio Direto	6	30	1,61	1,71	1,63	1,65	1,66	1,65	0,04
		60	1,23	1,10	1,14	1,15	1,26	1,17	0,06
		90	1,34	1,33	1,30	1,21	1,24	1,28	0,06
	7	30	1,44	1,34	1,44	1,45	1,39	1,41	0,05
		60	1,17	1,22	1,19	1,26	1,24	1,22	0,04
		90	1,22	1,22	1,23	1,30	1,28	1,25	0,04
	8	30	1,34	1,32	1,28	1,30	1,31	1,31	0,02
		60	1,46	1,46	1,49	1,47	1,47	1,47	0,01
		90	1,44	1,39	1,41	1,39	1,41	1,41	0,02
	9	30	1,29	1,37	1,31	1,30	1,30	1,31	0,03
		60	1,40	1,18	1,37	1,21	1,23	1,28	0,10
		90	1,12	1,17	1,27	1,38	1,21	1,23	0,10
	10	30	1,40	1,33	1,37	1,40	1,33	1,37	0,04
		60	1,27	0,98	1,29	1,27	1,26	1,21	0,13
		90	1,27	1,19	1,25	1,28	1,27	1,25	0,04

Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

ANEXO E – DADOS DE DENSIDADE DE PARTÍCULAS

Tabela 6 – Densidade de partículas nas unidades experimentais da área de estudo.

Sistema de Manejo	Unidade Experimental	Profundidade (cm)	Densidade de Partículas (g cm ⁻³)						
			Repetições					Média	Desvio Padrão
			1	2	3	4	5		
Sistema de Cultivo por Ervais	1	30	2,75	2,68	2,88	2,97	2,82	2,82	0,11
		60	2,69	2,74	2,99	2,93	2,94	2,86	0,13
		90	2,61	2,77	2,88	2,90	2,87	2,81	0,12
	2	30	2,87	2,89	2,94	2,96	2,83	2,90	0,05
		60	2,92	2,97	2,94	2,96	2,93	2,94	0,02
		90	2,91	2,76	2,85	2,72	2,91	2,83	0,09
	3	30	2,75	2,78	2,88	2,89	2,84	2,83	0,06
		60	2,99	2,98	2,95	2,93	2,97	2,96	0,02
		90	2,91	2,84	2,86	2,81	2,77	2,84	0,05
	4	30	2,86	2,87	2,77	2,96	2,83	2,86	0,07
		60	2,81	2,80	2,99	2,99	2,96	2,91	0,10
		90	2,97	2,93	2,94	2,93	2,95	2,94	0,02
	5	30	2,87	2,81	2,83	2,86	2,89	2,85	0,03
		60	2,79	2,96	2,94	2,87	2,82	2,88	0,07
		90	2,93	2,70	2,88	2,86	2,91	2,86	0,09
Sistema Plantio Direto	6	30	2,97	2,81	2,80	2,79	2,93	2,86	0,08
		60	2,69	2,77	2,71	2,79	2,71	2,73	0,04
		90	2,76	2,73	2,79	2,80	2,84	2,78	0,04
	7	30	2,91	2,99	2,70	2,78	2,81	2,84	0,11
		60	2,87	2,84	2,74	2,86	2,87	2,84	0,06
		90	2,91	2,76	2,78	2,77	2,74	2,79	0,07
	8	30	2,98	2,96	2,99	2,87	2,92	2,94	0,05
		60	2,87	2,74	2,76	2,72	2,73	2,76	0,06
		90	2,89	2,83	2,68	2,69	2,89	2,80	0,10
	9	30	2,97	2,99	2,93	3,01	3,05	2,99	0,04
		60	3,01	3,02	2,93	2,94	2,95	2,97	0,04
		90	2,97	2,96	2,98	2,95	2,98	2,97	0,01
	10	30	2,99	3,02	2,96	2,88	2,87	2,94	0,07

	60	2,97	3,02	3,06	2,87	2,99	2,98	0,07
	90	2,90	2,93	2,96	2,93	2,91	2,93	0,02

Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

ANEXO F – DADOS DE POROSIDADE TOTAL

Tabela 7 - Porosidade total nas unidades experimentais da área de estudo.

Sistema de Manejo	Unidade Experimental	Profundidade (cm)	Porosidade Total (%)						
			Repetições					Média	Desvio Padrão
			1	2	3	4	5		
Sistema de Cultivo por Ervais	1	30	62,6	52,0	57,4	51,6	39,7	52,7	8,5
		60	45,0	52,5	55,0	43,5	52,0	49,6	5,0
		90	50,5	43,6	56,6	57,8	43,0	50,3	7,0
	2	30	47,5	53,7	42,5	45,2	45,3	46,8	4,2
		60	60,1	61,8	60,1	63,3	62,1	61,5	1,4
		90	60,3	57,1	59,4	58,1	61,1	59,2	1,6
	3	30	48,7	56,1	61,0	54,1	57,5	55,5	4,5
		60	56,5	55,8	55,3	57,4	53,6	55,7	1,4
		90	51,5	56,6	53,6	50,0	51,9	52,7	2,5
	4	30	56,0	51,7	48,7	54,0	50,7	52,2	2,8
		60	52,1	47,5	60,9	54,7	52,9	53,6	4,9
		90	62,3	55,6	61,4	62,7	63,1	61,0	3,1
5	30	54,7	53,6	55,1	52,2	53,9	53,9	1,1	
	60	50,9	53,9	52,2	53,3	51,6	52,4	1,2	
	90	57,6	56,5	55,7	55,0	54,3	55,8	1,3	
Sistema Plantio Direto	6	30	45,7	39,3	42,0	40,8	43,4	42,2	2,4
		60	54,4	60,3	57,9	58,9	53,7	57,0	2,9
		90	51,5	51,3	53,3	56,8	56,4	53,8	2,6
	7	30	50,7	55,2	46,7	47,9	50,4	50,2	3,3
		60	59,1	57,2	56,6	55,8	56,8	57,1	1,2
		90	57,9	55,9	55,6	53,0	53,2	55,1	2,1
	8	30	55,0	55,5	57,1	54,6	55,1	55,5	1,0
		60	49,0	46,6	46,1	46,0	46,0	46,7	1,3
		90	50,1	50,8	47,4	48,4	51,1	49,6	1,6
	9	30	56,5	54,1	55,3	56,9	57,3	56,0	1,3
		60	53,7	61,0	53,2	58,9	58,4	57,0	3,4
		90	62,1	60,5	57,4	53,3	59,5	58,6	3,4
10	30	53,1	56,1	53,7	51,5	53,7	53,6	1,7	
	60	57,1	67,6	57,9	55,9	57,8	59,3	4,7	
	90	56,3	59,4	57,7	56,2	56,3	57,2	1,4	

Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).

ANEXO G – DADOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA

Tabela 8 - Condutividade Hidráulica Saturada nas unidades experimentais da área de estudo.

Sistema de Manejo	Unidade Experimental	Profundidade (cm)	Condutividade Hidráulica Saturada (mm h ⁻¹)						
			Repetições					Média	Desvio Padrão
			1	2	3	4	5		
Sistema de Cultivo por Ervais	1	30	1,75	0,87	3,27	6,55	3,42	3,17	2,17
		60	0,29	0,29	6,11	41,33	0,29	9,66	17,88
		90	0,15	0,44	0,29	0,87	0,58	0,47	0,28
	2	30	2,91	2,04	4,95	4,07	3,20	3,43	1,12
		60	4,95	2,91	1,75	2,04	9,02	4,13	3,01
		90	1,09	0,29	1,60	1,24	0,15	0,87	0,63
	3	30	1,98	5,24	3,11	2,71	2,33	3,07	1,28
		60	3,20	2,04	1,75	3,49	4,71	3,04	1,20
		90	1,46	2,33	1,83	1,16	0,58	1,47	0,66
	4	30	1,31	0,22	0,29	0,58	0,07	0,49	0,49

(Conclusão)

		60	0,58	8,15	0,36	0,73	0,44	2,05	3,41
		90	1,22	0,44	0,87	0,58	1,16	0,86	0,35
	5	30	0,87	0,44	1,02	1,46	1,60	1,08	0,47
		60	1,46	0,73	0,58	10,48	0,58	2,76	4,33
		90	0,87	0,84	0,44	0,58	1,16	0,78	0,28
	6	30	0,13	0,01	0,12	0,01	0,01	0,06	0,06
		60	0,29	0,12	0,09	0,01	0,07	0,11	0,11
		90	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	7	30	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
		60	0,03	0,87	0,01	0,02	0,17	0,22	0,37
		90	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01
	8	30	0,13	0,14	0,15	0,07	0,12	0,12	0,03
		60	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07	0,01
		90	0,09	0,17	0,12	0,14	0,16	0,14	0,03
	9	30	1,28	0,86	0,32	0,81	0,63	0,78	0,35
		60	1,16	3,20	6,40	8,29	4,80	4,77	2,76
		90	4,37	1,30	15,42	18,04	1,83	8,19	7,94
	10	30	1,75	1,86	1,16	3,67	1,57	2,00	0,97
		60	2,00	3,20	0,91	0,51	0,11	1,35	1,25
		90	0,44	0,29	2,40	0,58	0,80	0,90	0,86

Fonte: (PANZIERA, A. G., 2016).