

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação

**Funções hidráulico-energéticas na análise da qualidade física de Neossolos
sob diferentes usos em escala de bacia hidrográfica**

Angelo Garcia Costa

Pelotas, 2021

Angelo Garcia Costa

**Funções hidráulico-energéticas na análise da qualidade física de Neossolos
sob diferentes usos em escala de bacia hidrográfica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Luis Carlos Timm

Coorientador: Samuel Beskow

Pelotas, 2021

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

C837f Costa, Angelo Garcia

Funções hidráulico-energéticas na análise da qualidade física de neossolos sob diferentes usos em escala de bacia hidrográfica / Angelo Garcia Costa ; Luis Carlos Timm, orientador ; Samuel Beskow, coorientador. — Pelotas, 2021.

83 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2021.

1. Retenção de água no solo. 2. Usos do solo. 3. Qualidade física do solo. I. Timm, Luis Carlos, orient. II. Beskow, Samuel, coorient. III. Título.

CDD : 627

Angelo Garcia Costa

Funções hidráulico-energéticas na análise da qualidade física de Neossolos sob diferentes usos em escala de bacia hidrográfica

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre/Doutor em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 24 de fevereiro de 2021

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luis Carlos Timm (Presidente)

Doutor em Agronomia - Irrigação e Drenagem pela Universidade Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP.

Prof. Dr. Robson André Armindo

Doutor em Ciências pela Universidade de São Paulo.

Prof. Dr. Douglas Rodrigo Kaiser

Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria.

Agradecimentos

Agradeço e dedico este trabalho à minha mãe Ivone Adriana Garcia Costa, ao meu pai Claudinei Bergoli Costa e aos demais familiares, especialmente aos meus avós maternos Zuleica Frantz Garcia e Ivo Alberto Prestes Garcia por terem sido essenciais na minha educação e ao meu primo Matheus Köch Garcia, pelo auxílio nos ajustes e edições de diversas imagens.

À Universidade Federal de Pelotas, e especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, por terem me proporcionado esta formação acadêmica.

Ao meu orientador Luis Carlos Timm pelo seu apoio, confiança e disponibilidade.

Ao meu coorientador Samuel Beskow pela sua colaboração precisa em momentos cruciais.

A todos os professores que transmitiram seus conhecimentos, desde a minha pré-alfabetização até este momento.

Aos meus colegas de laboratório, especialmente ao Mauricio Fornalski Soares por ter gentilmente me cedido seu banco de dados para poder realizar este trabalho neste período de pandemia de Covid-19 e ao Miguel David Fuentes Guevara e ao Rômulo Félix Nunes por terem sido essenciais para a realização deste trabalho, me auxiliando em momentos essenciais.

Aos demais amigos e colegas por todo o auxílio, companheirismo e aprendizado.

“Nada pode ser obtido sem uma espécie de sacrifício.
É preciso oferecer algo de valor equivalente.”

Edward Elric.

Resumo

COSTA, Angelo Garcia. **Funções hidráulico-energéticas na análise da qualidade física de Neossolos sob diferentes usos em escala de bacia hidrográfica.** 2021. 83f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

Compreender a dinâmica da água no solo e a influência dos diferentes usos é um dos principais pilares da gestão dos recursos hídricos em bacias hidrográficas. Diversos atributos do solo têm sido utilizados para descrever a qualidade física dos solos, no entanto, desconsideram processos relacionados a retenção da água no solo. Como alternativa, surgem os índices baseados nas energias relacionadas com as curvas de retenção de água no solo (CRAS), aplicáveis em qualquer local de estudo, independente da escala e de suas características. Nesse sentido, este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade física de Neossolos sob diferentes usos a partir do uso das funções de energia hidráulica, em uma malha experimental contendo 170 amostras de solo, estabelecida na sub-bacia hidrográfica Sanga Ellert, localizada no município de Canguçu – RS. Foram determinadas em laboratório a densidade, a porosidade total, a macroporosidade, a microporosidade e a CRAS. Posteriormente foram calculados os índices de energia hidráulica (A_a , W_{ra} , A_r , W_{Rr} e A_{Wr}), os parâmetros da CRAS (θ_s , θ_r , α , n , m). Os conjuntos de dados foram submetidos a análises de estatística descritiva e multivariada, à fim de entender as relações entre os atributos do solo, os índices de energia hidráulica e os diferentes usos do solo. Os usos do solo influenciaram estatisticamente os índices de energia hidráulica, as energias de aeração e de retenção de água no solo da bacia hidrográfica da sanga Ellert estão diretamente relacionadas com os usos. A Mata Nativa possui uma boa qualidade física do solo, o solo com o uso de culturas anuais necessita de mais energia para a planta retirar água do solo e menor energia para atingir a θ_{cc} , sendo o uso onde existe o maior desequilíbrio entre estas energias. Devido principalmente à sua menor macroporosidade, o solo sob Pastagem necessitou de maior trabalho do potencial gravitacional para drenar a água da saturação a capacidade de campo.

Palavras-chave: Retenção de água no solo, Usos do solo, Qualidade física do solo.

Abstract

COSTA, Angelo Garcia. **Hydraulic-energetic functions in the analysis of the physical quality of Entisols under different uses in a hydrographic basin scale.** 2021. 83p. Dissertation (Master's Degree in Water Resources) – Graduate Program in Water Resources, Center of Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2021.

Understanding the dynamics of water in the soil and the influence of different uses is one of the main pillars of water resource management in river basins. Several soil attributes have been used to describe the physical quality of the soils. However, they disregard processes related to the behavior of water retention in the soil. Alternatively, the indexes based on the energies related to the soil water retention curves (SWRC) appear, being applicable in any study location, regardless of the scale and the characteristics of the place. In this sense, this study aimed to evaluate the physical quality of Entisol under different uses from the use of hydraulic energy functions in an experimental grid containing 170 soil samples, established in the Sanga Ellert sub-basin, located in the municipality of Canguçu - RS. Bulk density, total porosity, macroporosity, microporosity, and SWRC were determined in the laboratory. Subsequently, the five hydraulic energy indexes (A_a , W_{ra} , A_r , W_{Rr} and A_{Wr}), and the CRAS parameters (θ_s , θ_r , α , n , m). The data sets were subjected to descriptive and multivariate statistical analysis to understand the relationships between soil attributes, hydraulic energy indexes, and different soil uses. The different uses statistically influenced the indices of hydraulic energy, being evident that the energies of aeration and water retention in the soil of the hydrographic basin of the Sanga Ellert are directly related to the uses. The Native Forest has a good physical quality of the soil, soils under annual crops are the use that requires more energy for the plant to remove water from the soil and less energy to reach θ_{fc} , being the use where there is the most significant imbalance between these energies. Due mainly to its lower macroporosity, the soil under Pasture required greater work on the gravitational potential to drain the water from saturation to field capacity.

Keyword: Soil water retention, Soil uses, Physical soil quality.

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Interpretação do coeficiente de correlação de Spearman	38
Tabela 2 - Parâmetros físico-hídricos obtidos a partir de amostras de solo coletadas em regiões da BHSE ocupadas pelos diferentes usos do solo.	40
Tabela 3 - Parâmetros da CRAS obtidos a partir de amostras de solo coletadas em regiões ocupadas pelos diferentes usos do solo.	42
Tabela 4 - Índices de energia hidráulica obtidos a partir de amostras de solo coletadas em regiões da BHSE ocupadas pelos diferentes usos do solo.	45
Tabela 5 – Anova aplicada aos atributos físicos do solo.	55
Tabela 6 – Teste Tukey aplicado aos atributos físicos do solo.	55
Tabela 7 - Anova aplicada para os índices de energia-hidráulica absolutos.	56
Tabela 8 -Teste Tukey para os índices de energia-hidráulica absolutos.	56
Tabela 9 - Anova aplicada para os índices de energia-hidráulica relativos.	56
Tabela 10 - Teste Tukey para os índices de energia-hidráulica relativos.	57
Tabela 11 - Anova para o índice AWr.	57
Tabela 12 - Teste Tukey para o índice AWr.	57
Tabela 13 - Coeficiente de correlação de Spearman entre os atributos físico-hidráulicos e índices de energia hidráulica nos diferentes usos do solo.	60

Lista de Figuras

Figura 1 - Estrutura da molécula da água e superfície dos minerais de argila	17
Figura 2 - Ilustração do espaço poroso de uma amostra de solo ocupado pela água e pelo ar no ponto de murcha permanente, na capacidade de campo e no ponto de saturação do solo	19
Figura 3 - Mesa de tensão.....	23
Figura 4 - Câmara de Pressão de Richards	24
Figura 5 - Localização, topografia, hidrografia e malha amostral da bacia hidrográfica sanga Ellert (BHSE).	30
Figura 6 - Pontos cotados nas campanhas de campo na bacia hidrográfica da Santa Ellert, para geração do modelo digital de elevação do terreno	31
Figura 7 - Usos do solo da bacia hidrográfica sanga Ellert (BHSE).	32
Figura 8 - Representação geométrica das integrais definidas das CRAS para os índices de energia hidráulica propostos por Armindo (2013) e Armindo e Wendroth (2016, 2019).	34
Figura 9 - Gráfico em caixa (<i>box-plot</i>) ilustrando as informações a respeito da distribuição de um conjunto de dados	37
Figura 10 - Gráficos em caixa da umidade na saturação (θ_s); umidade residual (θ_r); tensão de água na capacidade de campo (h_{cc}); umidade na capacidade de campo (θ_{cc}); e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) obtidos a partir de amostras coletadas em áreas com diferentes usos do solo.	47
Figura 11 - Gráficos em caixa da densidade do solo (D_s); porosidade total (PT); microporosidade (Mic); e macroporosidade (Mac) obtidos a partir de amostras coletadas em áreas com diferentes usos do solo.....	49
Figura 12 - Gráficos em caixa dos índices de energia-hidráulica absoluto de aeração (A_a); absoluto de retenção de água no solo (WR_a); relativo de aeração (A_r); relativo de retenção de água no solo (WR_r); relativo da relação ar-água do solo (AW_r); obtidos a partir de amostras coletadas em áreas com diferentes usos do solo.	51
Figura 13 - CRAS características dos solos sob uso de Culturas Anuais; Mata Nativa; Silvicultura e Pastagem.....	53
Figura 14 - Dendrograma para os diferentes usos do solo	64
Figura 15 - Análise dos Componentes Principais para os diferentes usos do solo ...	66

Lista de Abreviaturas e Siglas

Aa	Índice absoluto de aeração do solo (hPa)
ACP	Análise dos Componentes Principais
Ar	Índice relativo do potencial de aeração do solo (%)
Ass	Coeficiente de assimetria
AWr	Índice que compara a energia de aeração do solo com a energia de retenção de água do solo (%)
BHAP	Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas
BHSE	Bacia Hidrográfica da Sanga Ellert
Curt	Coeficiente de curtose
CRAS	Curva de Retenção de Água no Solo
CV	Coeficiente de variação
Ds	Densidade do solo (g cm^{-3})
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAEM	Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
GPS	Global Position System
hcc	Tensão da água no solo na capacidade de campo (cm)
Ksat	Condutividade hidráulica do solo saturado
m	Parâmetro de forma ($1-1/n$)
Macro	Macroporosidade (%)
MDE	Modelo Digital de Elevação
Med	Mediana
Micro	Microporosidade (%)
n	Parâmetro de forma
PT	Porosidade total (%)
p-valor	Probabilidade de significância
RSE	Erro padrão residual
S	Desvio Padrão
S-W	Teste Estatístico de Shapiro-Wilk
UFFS	Universidade Federal da Fronteira Sul
UFPeI	Universidade Federal de Pelotas
VGM	Equação de Van Genuchten-Mualem
WRa	Índice absoluto de retenção de água (hPa)
WRr	Índice relativo de retenção de água (%)
\bar{X}	Média
α	Fator de escala da CRAS
θ	Conteúdo de água volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
θ_{cc}	Conteúdo de água na capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
θ_{pmp}	Conteúdo de água no ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
θ_s	Conteúdo de água no ponto de saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
θ_r	Conteúdo de água residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
ψ	Potencial total da água no solo
ψ_g	Potencial gravitacional
ψ_m	Potencial Matricial
ψ_{os}	Potencial Osmótico
ψ_P	Potencial de Pressão

SUMÁRIO

1. Introdução	11
2. Objetivos	14
3. Hipóteses	14
4. Revisão de Literatura	15
4.1 Retenção de água no solo	15
4.2 Curva de retenção de água no solo	18
4.3 Capacidade de campo (CC)	20
4.4 Ponto de murcha permanente (PMP)	20
4.5 Capacidade de água disponível (CAD)	21
4.6 Métodos de obtenção da CRAS	22
4.7 Influência do tipo de solo e dos usos na retenção de água no solo	25
4.8 Modelo de Van Genuchten-Mualem	26
4.9 Indicadores da qualidade física do solo	27
5. Material e Métodos	30
5.1 Caracterização do local de estudo	30
5.2 Delimitação da malha experimental	32
5.3 Amostragem de solo e análises laboratoriais	33
5.4 Metodologia estatística empregada	35
6. Resultados e Discussão	39
6.1 Análise Exploratória	39
6.2 Testes de Médias (F e Tukey)	54
6.3 Teste de Correlação de Spearman	59
6.4 Análise de Agrupamentos	63
6.5 Análise dos Componentes Principais	65
7. Conclusões	67
8. Considerações finais	67
Referências	69

1. Introdução

O solo é um recurso natural não renovável essencial em todos os ecossistemas terrestres, estando diretamente relacionado com a história da evolução humana, sendo responsável por diversas dinâmicas ambientais e econômicas, desde a produção de alimentos à sustentação de construções (LEPSCH, 2010).

O conhecimento e entendimento da relação entre o sistema solo-água e a influência dos efeitos antrópicos (tipo de uso do solo, manejo adotado pelo produtor, etc.) são uns dos principais desafios das ciências agrárias, ambientais e hidrológicas. Dentre os diversos atributos físico-hidráulicos oriundos desta relação, destacam-se os relacionados a retenção da água no solo, a qual representa a quantidade de água que um determinado solo pode armazenar em sua matriz (GARCÍA *et al.*, 2014; LIBARDI, 2018; REICHARDT e TIMM, 2020). Portanto, o conhecimento do comportamento da água no solo é essencial para uma definição adequada de usos, manejos e das melhores técnicas conservacionistas (DI PRIMA *et al.*, 2018), para melhor planejar e executar corretamente diversos sistemas, como por exemplo, os projetos de irrigação e drenagem.

A avaliação das curvas de retenção de água no solo (CRAS) permite uma estimativa da disponibilidade de água no solo para as plantas, na profundidade de solo considerada, sendo uma propriedade físico-hidráulica do solo determinada experimentalmente, pois a formação do solo é dinâmica, existindo variabilidade espacial destes atributos, sendo necessário coletar dados a campo com o auxílio de técnicas de amostragem (MAMEDOV *et al.*, 2016; REICHARDT e TIMM, 2020). As CRAS relacionam o teor ou o conteúdo de água no solo com a energia (tensão) com que ela está retida na matriz do solo (KARUP *et al.*, 2017; DE JONG VAN LIER, 2020).

Diversos autores têm utilizado grandezas como macroporosidade, densidade do solo e resistência à penetração com indicadores da qualidade física do solo (REYNOLDS *et al.*, 2002, 2009; PULIDO-MONCADA *et al.*, 2014a, 2014b). Desta maneira Armindo e Wendroth (2016, 2019) propuseram novos índices como uma alternativa para analisar a qualidade física do solo a partir da CRAS, pois segundo os autores a qualidade física do solo não pode ser inferida limitando-se sua análise a

um único ponto de uma função hidráulica, mas sim utilizar vários pontos ou incluir a totalidade da função hidráulica.

O formato da CRAS é considerado um indicador, estando diretamente relacionado com o tipo de solo, material de origem, granulometria, estrutura e, conseqüentemente, com o desenvolvimento das plantas, pois a variação da umidade subsuperficial está ligada diretamente com o desenvolvimento destas. Os índices de qualidade física do solo propostos pelos autores supracitados são o índice absoluto de aeração do solo (Aa), o índice absoluto de retenção de água do solo (WRa), o índice relativo de aeração (Ar), o índice relativo de retenção de água do solo (WRr) e o índice relativo ar-água do solo (AWr), sendo aplicáveis em qualquer local de estudo, independente da escala e das características do local, pois baseiam-se nas energias de aeração e retenção de água do solo.

Áreas cultivadas com maior diversidade de culturas e sujeitas a diferentes práticas de manejo do solo podem apresentar variação no comportamento dos atributos físico-hidráulicos do solo, tais como densidade, porosidade total, microporosidade e macroporosidade, condutividade hidráulica do solo e curva de retenção de água no solo. Assim, é essencial avaliar a relação entre os tipos de uso do solo e os atributos físico-hidráulicos do solo (PRICE, 2011; FERRO *et al.*, 2014; LI *et al.*, 2020), no intuito de auxiliar os agricultores na tomada de decisões quanto ao manejo do solo e práticas culturais a serem adotadas visando a exploração agrícola de forma sustentável, econômica e racional.

A bacia hidrográfica, segundo a Lei Federal nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997, tem sido adotada como a unidade territorial para fins de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil. Dentre as bacias hidrográficas existentes no extremo sul do estado do Rio Grande do Sul, a bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP) é estratégica para o desenvolvimento econômico e social da região, em particular para os municípios de Pelotas, Morro Redondo, Arroio do Padre e Canguçu. A BHAP tem área total de aproximadamente 940 km², sendo responsável pelo fornecimento de cerca de 50% da água usada para o abastecimento do município. Além do abastecimento de Pelotas, o Arroio Pelotas possui um valor histórico e cultural incalculável para a região sul do Rio Grande do Sul. Cabe ressaltar que o curso d'água principal da BHAP (Arroio Pelotas) é um importante afluente do canal São Gonçalo, o qual abastece o município de Rio Grande – RS e ainda é uma via navegável importante que liga a laguna dos Patos à

Lagoa Mirim. A BHAP é constituída por várias sub-bacias, dentre elas pode-se destacar a sub-bacia da sanga Ellert (BHSE) que é uma bacia de cabeceira da BHAP.

A BHSE está inteiramente localizada no município de Canguçu, que se caracteriza por ser o município do Rio Grande do Sul com o maior número de pequenas propriedades rurais (SOARES, 2018). Devido aos cultivos anuais, principalmente de fumo e a fragilidade natural dos Neossolos (principal classe de solos encontrados nessa sub-bacia) é necessário investigar alternativas e ferramentas que possam contribuir na preservação da área da bacia. Por ser uma bacia de cabeceira da Bacia hidrográfica do Arroio Pelotas, as ações antrópicas desenvolvidas na área da bacia são potencialmente refletidas no comportamento dos diferentes processos hidrológicos a jusante da sua seção de controle. Isto pode provocar a aceleração dos processos erosivos e de degradação da camada superficial do solo onde as principais interações entre o sistema solo-água-planta-atmosfera ocorrem (BESKOW *et al.*, 2016; SOARES *et al.*, 2020).

Desta maneira, analisar a qualidade físico-hidráulica da camada superficial de um Neossolo, de estrutura reconhecidamente frágil, cultivada com diferentes tipos de usos de solos por meio de suas funções hidráulico-energéticas poderá dar subsídios e auxiliar os agricultores a desenvolverem suas atividades agrícolas na BHSE visando minimizar o impacto das ações antrópicas e nortear futuras práticas de conservação, preservação e recuperação do solo.

2. Objetivos

2.1. Geral

Avaliar a influência dos usos do solo sobre a qualidade físico-hidráulica de Neossolos na sub-bacia hidrográfica da sanga Ellert com o auxílio dos índices de energia hidráulica.

2.2. Específicos

- I. Quantificar os índices de energia hidráulica em cada tipo de uso do solo em escala de bacia hidrográfica;
- II. Analisar a relação entre os tipos de usos do solo e os índices de energia hidráulica;
- III. Avaliar a relação entre os índices de energia hidráulica calculados em cada tipo de uso do solo com os atributos físico-hidráulicos do solo na camada de 0-0,20 m de profundidade.

3. Hipóteses

- I. A qualidade físico-hidráulica do solo na bacia hidrográfica da sanga Ellert está diretamente relacionada com o tipo de uso do solo.
- II. Os índices de energia hidráulica expressam a qualidade físico-hidráulica do solo em escala de bacia hidrográfica.
- III. O tipo de uso do solo identificado como Pastagem possui um efeito negativo nos índices de energia hidráulica.

4. Revisão de Literatura

4.1. Retenção de água no solo

Os caminhos de fluxo e seus padrões são altamente sensíveis à quantidade de água no solo, sendo que este fluxo é dado pela estrutura porosa, a qual é heterogênea em todas as escalas espaciais, variando na escala micrométrica até partículas de grandes tamanhos, esta variação é originada desde os fatores de formação do solo até o uso e manejo do mesmo (VOGEL, 2019). Desta forma, os principais fatores que afetam a retenção e o fluxo da água no solo são o material de origem, o tipo de relevo, a textura, a estrutura, a densidade, a porosidade, a permeabilidade, os usos do solo, a temperatura, a precipitação, os escoamentos superficiais e subsuperficial (JURY *et al.*, 1990; BACHMANN e PLOEG, 2002; SILVA, 2005; URACH, 2007; NASCIMENTO, 2009; dos SANTOS, 2015; USGS, 2016; SINGH *et al.*, 2017; REICHARDT e TIMM, 2020).

Solos de textura mais fina retém maior porcentagem de água ao longo de toda a faixa de energia, pois possuem maior proporção de microporos, conseqüentemente maior espaço poroso, maior porcentagem de material coloidal e superfície adsorptiva superior, enquanto solos de textura mais grosseira possuem maior proporção de macroporos, menor espaço poroso, menor porcentagem de material coloidal e superfície adsorptiva inferior (COSBY *et al.*, 1984; VOGEL *et al.*, 2006; LEPSCH, 2010; SOARES, 2018; SOARES *et al.*, 2020).

Reichardt e Timm (2020) afirmam que o solo retém a água no seu espaço poroso com forças que aumentam de intensidade conforme a quantidade de água diminui, portanto, para retirar a quantidade de água em equilíbrio existente em um solo é necessário o uso de energia, sendo maior quanto mais seco estiver o solo. Essas forças se manifestam devido à presença da matriz do solo, sendo denominadas de forças matriciais. Elas são classificadas em dois tipos, as forças capilares, que são responsáveis pela retenção da água nos microporos dos agregados e as forças de adsorção, que são responsáveis pela retenção da água nas superfícies das partículas do solo (VIEIRA e CASTRO, 1987; LIBARDI, 2018; REICHARDT e TIMM, 2020).

Reichardt (1985), Davalo (2013) e Reichardt e Timm (2020) definem o potencial total da água no solo (ψ) como o somatório de cinco potenciais, sendo eles

o potencial térmico, de pressão (ψ_P), gravitacional (ψ_g), osmótico (ψ_{os}) e matricial (ψ_m). Devido ao fato de as variações de temperatura que ocorrem no sistema solo-água-plantas-atmosfera serem muito pequenas, o potencial térmico torna-se muitas vezes desprezível. Desta maneira, a equação do potencial total de água no solo (ψ) (Equação 1) pode ser descrita seguinte forma:

$$\psi = \psi_P + \psi_g + \psi_{os} + \psi_m \quad (1)$$

ψ_P : Apenas é considerada quando a pressão que atua sobre a água é maior e diferente do que a pressão atmosférica. Para pressões negativas, considera-se a componente matricial ψ_m . Sendo assim, a componente de pressão é importante para solos saturados.

ψ_g : Ocorre devido à presença do campo gravitacional terrestre. É o potencial de maior importância em solos saturados ou próximos da saturação.

ψ_{os} : Ocorre pois a água no solo é uma solução de diversos íons e outros solutos e a água padrão é pura.

O potencial matricial (ψ_m) também denominado de tensão da água no solo quando expresso em módulo, sucção ou pressão negativa é a somatória de todos os outros trabalhos que envolvem a interação entre a matriz do solo e a água. As variações deste potencial se dão para um mesmo solo com diferentes teores de umidade, sendo que em um solo úmido os mecanismos das forças dos capilares são de maior importância e à medida que esta umidade decresce, as forças adsorptivas tornam-se mais importantes com a retenção ocorrendo como filmes de água presos às superfícies dos sólidos do solo.

Sendo assim, devido aos solos arenosos apresentarem poros e partículas relativamente grandes, o fenômeno de adsorção é relativamente menor e os fenômenos capilares predominam na determinação do potencial matricial (REICHARDT e TIMM, 2020)

Libardi (2018) aponta que existem três mecanismos principais no processo de adsorção da água sobre as superfícies sólidas, sendo eles enumerados abaixo:

1. A superfície dos minerais de argila é coberta com átomos de oxigênio e grupos oxidrilas, criando ao redor das partículas desses minerais um campo elétrico cuja intensidade decresce com o aumento da distância da superfície da partícula.

2. Os pares de elétrons não compartilhados do átomo de oxigênio das moléculas de água podem ser atraídos eletricamente a cátions trocáveis que podem estar sobre a superfície da partícula de argila, ou seja, os cátions que são retidos à superfície negativamente carregada de argila ocasionam também a adsorção das moléculas de água.

3. As moléculas de água podem ser atraídas até as superfícies sólidas pelas forças de London-van der Waals, que são forças de curto alcance e decrescem rapidamente com a distância da superfície, de modo que uma camada muito fina é adsorvida dessa maneira ao redor das partículas de solo

Lepsch (2010) cita que a argila é bastante ativa quimicamente, pois apresenta partículas de pequeno tamanho, o que lhe confere propriedades coloidais, fazendo com que tenha uma vasta superfície específica e grande atividade de cargas elétricas, e conseqüentemente possua afinidade pela água e por elementos químicos nela dissolvidos, ocorrendo assim a troca de cátions (Figura 1). Sua capacidade de adsorver e ceder nutrientes faz com que pequenas quantidades de argila aumentem a dinâmica do solo, principalmente no horizonte A.

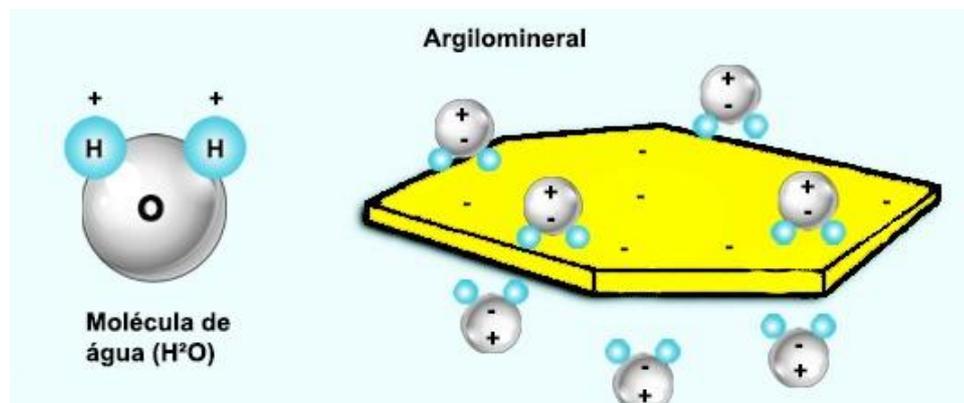


Figura 1 - Estrutura da molécula da água e superfície dos minerais de argila. Adaptado de Lepsch (2010).

À medida que o solo perde umidade estas forças capilares e de adsorção tornam-se mais atuantes, pois elas dependem de fatores como o tipo e a quantidade de argila, o arranjo, a distribuição e a quantidade de poros, a tensão superficial da água e a afinidade da solução aquosa com as partículas do solo (SILVA, 2005; URACH, 2007; NASCIMENTO, 2009).

A tensão superficial é definida como um fenômeno típico que ocorre na interação entre líquido e gás, na qual a maioria dos líquidos apresentam a tendência

permanente de se contrair (REICHARDT e TIMM, 2020). As moléculas presentes no interior do líquido são atraídas em todas as direções por forças iguais, as forças presentes na superfície são atraídas para dentro da fase líquida, mais densa, com forças maiores do que as forças atrativas para a fase gasosa, menos densa. Estas forças não balanceadas fazem com que as moléculas da superfície tendam em direção ao interior do líquido, resultando na tendência da superfície se contrair.

4.2. Curva de retenção de água no solo

A curva de retenção de água no solo (CRAS) é uma função indicadora da qualidade física do solo, expressa a relação entre o conteúdo de água no solo e o potencial matricial, permitindo, por exemplo, calcular a quantidade de água que um solo pode reter dentro de determinados limites de potencial matricial (ψ_m). Mediante a CRAS é possível calcular o armazenamento de água no solo, estando diretamente relacionado com o desenvolvimento das plantas (URACH, 2007; DE JONG VAN LIER, 2020). A CRAS expressa a energia com que a água está retida dentro da matriz do solo, sendo influenciada diretamente pelas características físicas e químicas do mesmo.

A partir da CRAS é possível determinar a porosidade total, a macroporosidade, a microporosidade, a capacidade de campo (CC), o ponto de murcha permanente (PMP), a capacidade de água disponível (CAD), sendo uma ferramenta útil para a determinação da variabilidade do armazenamento de água no solo (LEPSCH, 2010; ARMINDO e WENDROTH, 2016, 2019; REICHARDT e TIMM, 2020).

A relação ψ_m versus θ é potencial, considerando o modelo matemático proposto por van Genuchten (1980) para descrevê-la, sendo assim são determinados experimentalmente um número maior de pares $\psi_m - \theta$ na faixa mais úmida do solo, como por exemplo, valores de ψ_m de 0; -60; -100; -330; -1000; -3000; -5000 e -15000 hPa. Cabe ressaltar que 1 hPa equivale a 0,1 kPa. Alguns destes valores de ψ_m têm sido adotados na literatura para um melhor entendimento da interação solo-água já que expressam o estado energético que a água encontrasse retida na matriz do solo, tais como:

- ψ_m igual a 0 hPa: ponto de saturação do solo;

- ψ_m igual a -60 hPa: tem sido adotado como o potencial que se refere ao limite de separação entre os macroporos e os microporos. O volume de água retido entre os potenciais de 0 e -60 hPa é considerado como o volume de água retido nos macroporos, enquanto que o retido nos potenciais menores que -60hPa é considerado como o retido nos microporos (REICHARDT e TIMM, 2020);
- ψ_m igual a -100 hPa: o volume de água retido nesse potencial tem sido adotado como a capacidade de campo (CC) para solos de textura grosseira, enquanto o retido no ψ_m de -330 hPa tem sido adotado como a capacidade de campo em solos de textura fina;
- ψ_m igual a -15000 hPa: o conteúdo de água retido nesse potencial tem sido adotado como o ponto de murcha permanente (PMP).

O comportamento da relação entre o conteúdo de água no solo e o potencial matricial, é interessante, muitas vezes, representar em gráfico $\log |\psi_m|$. Como o $\log 0 = -\infty$, este ponto não é considerado na representação gráfica da CRAS (ARMINDO e WENDROTH, 2019).

A Figura 2 destaca a importância dos fenômenos capilares na determinação do ψ_m em conteúdos de água próximos a saturação do solo, onde a CRAS depende principalmente da dimensão e do arranjo dos poros, ou seja, da estrutura do solo. Já para baixos teores de água, os fenômenos de adsorção tornam-se preponderantes sobre os capilares (REICHARDT e TIMM, 2020).

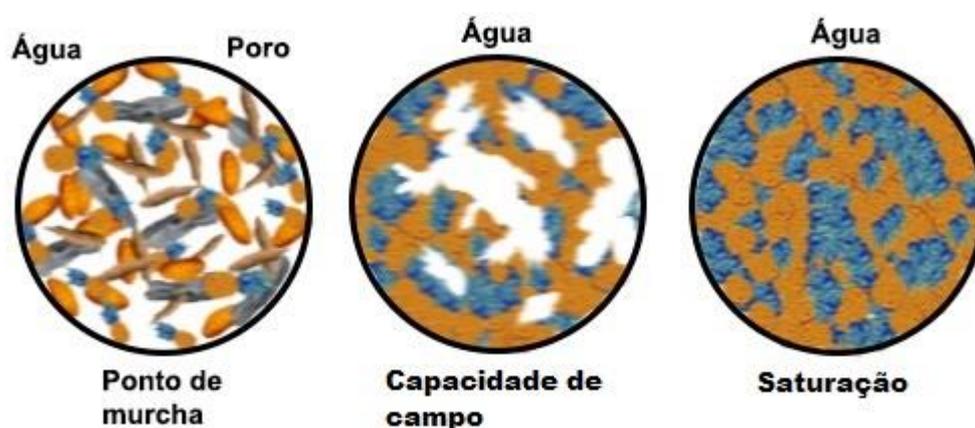


Figura 2 - Ilustração do espaço poroso de uma amostra de solo ocupado pela água e pelo ar no ponto de murcha permanente, na capacidade de campo e no ponto de saturação do solo. Adaptado de LEPSCH (2010).

4.3. Capacidade de campo (CC)

É definido como o conteúdo de água retido na matriz do solo depois que o excesso de água foi drenado e a taxa de movimento descendente diminuiu. Prevedello (1999) menciona que o valor da CC é dependente do fluxo de drenagem interna do solo, o qual é rapidamente decrescente com o tempo e praticamente nunca cessa, tornando difícil definir um momento para sua determinação.

O valor exato da CC não é uma constante, servindo como uma medida prática da água do solo, sendo dependente de alguns fatores como a formação e o tipo de solo. Os valores de tensão referentes a CC comumente adotados são os de 100 hPa para solos de textura grossa e 330 hPa para solos de textura fina (BERNARDO *et al.*, 2008; COELHO *et al.*, 2014; FELISBERTO *et al.*, 2014; ARMINDO e WENDROTH, 2016).

Lepsch (2010) define a CC de várias formas, tais como: a quantidade máxima de água que pode permanecer nos poros do solo depois que o movimento descendente da água diminui de forma acentuada; a condição de umidade do solo depois que toda a água livre foi deixada de ser drenada pela gravidade; e como sendo o limite superior da água disponível para as plantas.

Lepsch (2010) e Reichardt e Timm (2020) explicam de forma didática a CC, onde se imagina o solo como sendo uma esponja imersa em água, sendo colocada sobre uma peneira e em contato com o ar. Primeiramente, será observada uma grande quantidade de gotas d'água caindo de sua face inferior; com o tempo as gotas irão demorar mais para cair, até cessarem. Neste momento, pode-se dizer que o conteúdo de água retido na esponja se encontra na capacidade de campo, ou seja, a capacidade máxima da esponja em reter água em equilíbrio com as forças de gravidade, pois ela atingiu sua capacidade máxima de armazenamento de água naquelas condições.

4.4. Ponto de murcha permanente (PMP)

O ponto de murcha permanente (PMP) é definido como o conteúdo de água retido na matriz do solo no qual a planta não consegue mais retirar água (TOLK, 2003). Nessa tensão as plantas murcham permanentemente, ou seja, não são mais capazes de se recuperar, mesmo fornecendo água, por que suas células não

conseguem voltar ao turgor inicial (REICHARDT e TIMM, 2020). Muitos fatores influenciam a quantidade de água que uma planta pode extrair do solo antes de murchar, como a sua textura, o tamanho dos seus poros, as suas propriedades adsorptivas, resistência a penetração, sistema radicular das plantas (BERNARDO *et al.*, 2008; LEPSCH, 2010; COELHO *et al.*, 2014; FELISBERTO *et al.*, 2014).

O valor de tensão comumente empregado na literatura é de 15000 hPa (VIEIRA e CASTRO, 1987; TOLK, 2003; SILVA, 2005; REBOUÇAS, 2016; TEIXEIRA, 2017), porém este valor depende da textura do solo, com uma ocorrência de murcha em potenciais matriciais mais elevados para solos arenosos do que para solos argilosos (WIECHETECK *et al.*, 2020).

4.5. Capacidade de água disponível (CAD)

Nem toda a quantidade de água armazenada no solo está disponível para as plantas. A demanda das plantas depende da transpiração, a qual varia muito de acordo com as condições climáticas e com a densidade das raízes e sua eficiência como superfície de absorção, o que depende da condutividade hidráulica das raízes e do solo (KRAMER e BOYER, 1995).

Segundo Brady e Weil (1999), primeiramente as raízes removem a água dos macroporos, onde seu potencial é relativamente alto e a medida que esses poros são esvaziados, as raízes absorverão água de poros progressivamente menores nos quais o potencial mátrico é mais baixo e as forças de atração da água às superfícies sólidas são maiores. Assim, à medida que o solo seca, se tornará progressivamente mais difícil para as plantas remover água do solo a uma taxa suficiente para suprir suas necessidades.

Neste sentido, tem-se considerado que o conteúdo de água retido na matriz do solo entre a CC e o PMP como a quantidade de água que está disponível para o crescimento vegetal (LIBARDI, 2018). Por não possuir um conceito rígido, a quantidade de água que pode ser utilizada pelas plantas depende de uma série de fatores do solo. No solo, a porcentagem varia principalmente devido à quantidade e o tipo de argila, à quantidade de matéria orgânica e à concentração de sais.

4.6. Métodos de obtenção da CRAS

4.6.1. Mesa de Tensão

A mesa de tensão é, na maioria das vezes, o equipamento usado para a determinação do conteúdo de água no solo retido na faixa de tensões de 0 a 100 hPa (Figura 3). Seu princípio de funcionamento é explicado por Teixeira *et al.* (2017) da seguinte maneira: a mesa de tensão se baseia na remoção de água até um determinado valor controlado por meio da aplicação de uma diferença de tensão gerada por uma coluna de água ou por uma bomba de vácuo, onde as tensões aplicadas às amostras, comumente, são 0; 10; 30; 60 e 100 hPa. Quando a tensão com que a água está retida na amostra de solo entra em equilíbrio com a tensão aplicada, determina-se o conteúdo de água retido referente àquela tensão aplicada, usando, por exemplo, o método padrão de determinação da umidade do solo por meio de uma estufa.

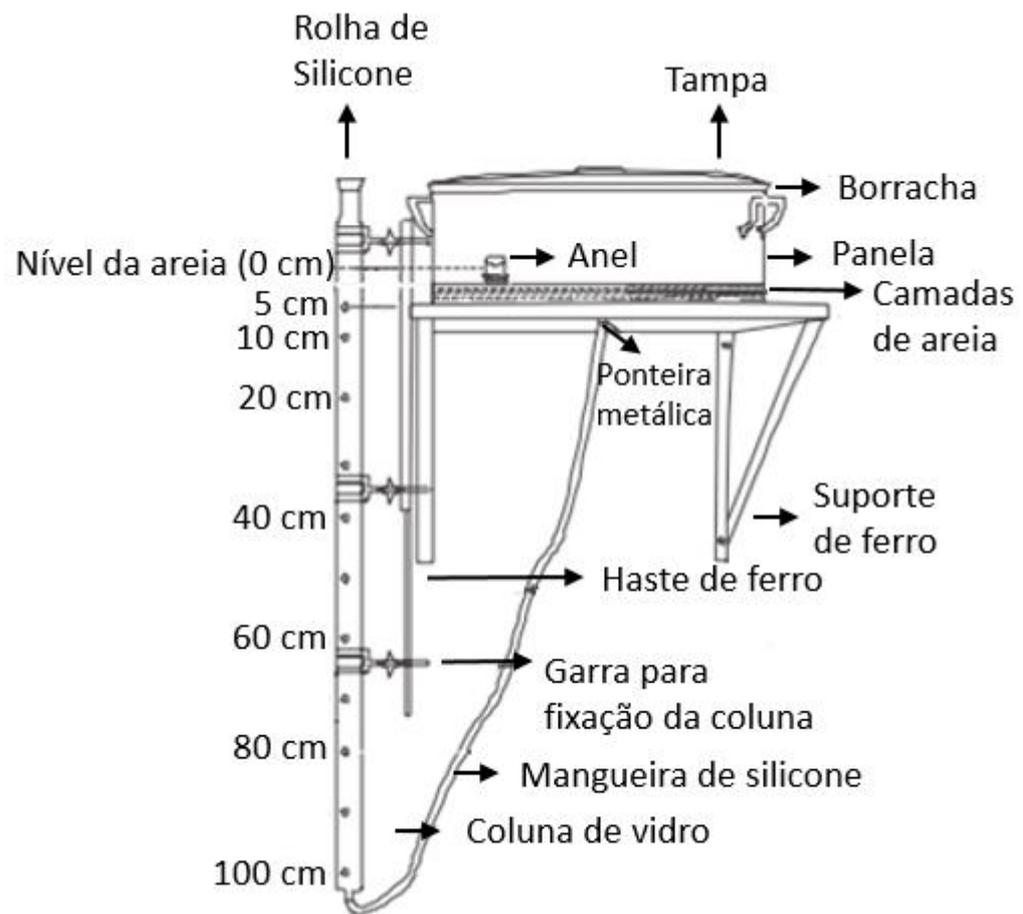


Figura 3 - Mesa de tensão. Fonte: Lima e Silva (2008)

A amostra de solo indeformada recebe a adição de telas de nylon fixadas na parte inferior dos cilindros volumétricos com o auxílio de elásticos, este conjunto é colocado em bandejas com água até metade da altura dos anéis volumétricos para saturar a amostra de solo de baixo para cima. Após a saturação do solo, a amostra de solo é colocada em contato com a placa porosa da mesa, previamente saturada, sempre buscando um adequado contato entre a parte inferior da amostra de solo e a placa porosa. A partir disso, a amostra de solo é submetida às tensões previamente escolhidas e os respectivos conteúdos de água são determinados. Assim, a umidade pode ser determinada por pesagens sucessivas ou pela observação do momento em que parou de sair água da amostra de solo (LIMA e SILVA, 2008; TEIXEIRA *et al.*, 2017; LIBARDI, 2018).

4.6.2. Câmara de Pressão de Richards

A câmara de pressão de Richards (Figura 4) é o equipamento que tem sido usado para a determinação do conteúdo de água retido no solo na faixa de tensões acima de 100 hPa (SILVA, 2005; URACH, 2007; NASCIMENTO, 2009; DAVALO, 2013; TEIXEIRA *et al.*, 2017; REICHARDT e TIMM, 2020). Resumidamente: a amostra de solo é previamente saturada com água por um período de 24 horas ou mais, posteriormente, sendo pesada; a amostra é colocada em contato com a placa de cerâmica porosa, previamente saturada, dentro do equipamento; o equipamento é fechado e valores de pressão em ordem crescente são aplicados a amostra de solo que está dentro da câmara de pressão hermeticamente fechada.

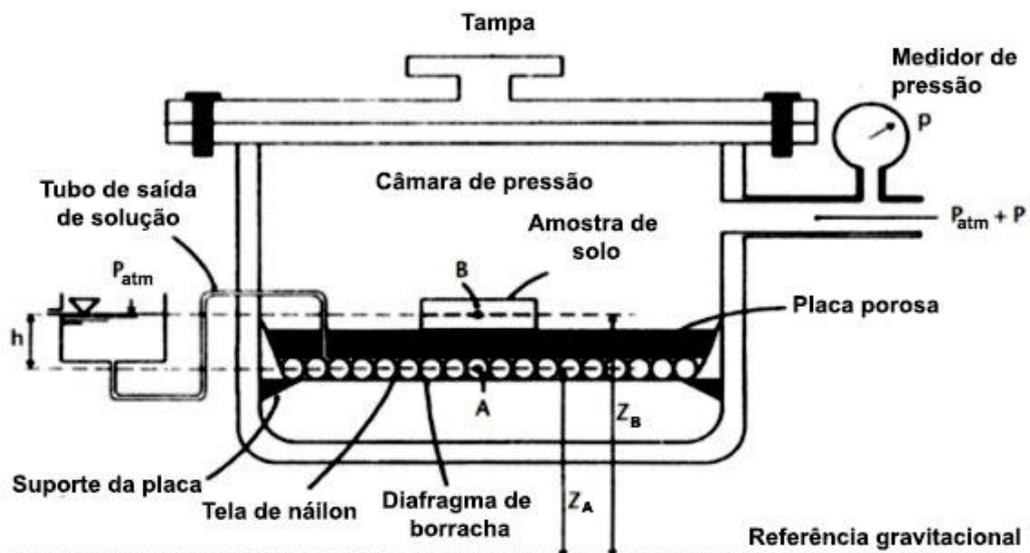


Figura 4 - Câmara de Pressão de Richards. Fonte: Libardi (2018).

A pressurização na câmara é fornecida por um sistema de compressores, reguladores de pressão e manômetros, onde a pressão aplicada é ajustada. A água que está retida dentro da amostra de solo sob pressões menores que a pressão aplicada pelo equipamento se move em direção ao sistema de drenagem através da placa porosa de cerâmica. O equilíbrio é atingido quando a drenagem cessa, sendo o conteúdo de água determinado por gravimetria. Neste momento, a tensão com que água que se encontra retida na matriz do solo é igual a pressão aplicada pelo equipamento dentro da câmara de pressão (TEIXEIRA *et al.*, 2017; REICHARDT e TIMM, 2020).

4.7. Influência do tipo de solo e dos usos na retenção de água no solo

Os diferentes tipos de usos do solo influenciam o comportamento da água no seu perfil, principalmente na sua camada superficial (chamada comumente de camada arável e que corresponde a faixa de 0-20 cm de profundidade), onde as atividades antrópicas (aração, gradagem, etc) realizadas ao longo dos cultivos podem causar compactação, modificando a porosidade do solo, fazendo com que as suas características de retenção e de infiltração sejam alteradas (ARCHER *et al.*, 2013; YU *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2018; KURNIANTO *et al.*, 2019). Wang *et al.* (2015) concluíram que solos cobertos possuem taxas de escoamento superficial menores e conseqüentemente, menor produção de sedimentos e erodibilidade do solo.

Os solos florestais (silvicultura e mata nativa) possuem uma melhor estrutura física devido à grande presença de raízes oriundas das árvores, suas regenerações e outros tipos de vegetação que podem compor as florestas (WOOD, 1977; ARCHER *et al.*, 2013; KURNIANTO *et al.*, 2019). Zwirtes *et al.* (2013) observaram que locais com mata nativa mantidas inalteradas possuíam solos menos densos, com melhor retenção de água e uma maior taxa de infiltração, quando comparadas ao sistema plantio direto e pastagem perene cultivada. Estas áreas também apresentam uma menor geração de escoamento superficial (GERMER *et al.*, 2010; LIU *et al.*, 2018; KURNIANTO *et al.*, 2019) do que solos sob outros tipos de uso, sendo importante citar que a destruição da mata ciliar pode, a médio e longo prazos, prejudicar a capacidade de armazenamento de água no solo (LIMA, 2008).

Yu *et al.* (2015) corroboram que a conversão de áreas agrícolas em áreas nativas (gramíneas e florestas) promovem as capacidades de infiltração, aeração e de armazenamento de água no solo, além do aumento da macroporosidade. Sampietro *et al.* (2015) comprovaram que o trânsito de que máquinas florestais de grande porte afetaram negativamente os atributos físicos de Neossolos desde a superfície até camadas mais profundas (80 cm).

Minosso *et al.* (2017) observaram que as culturas anuais possuem maior variação de água no solo entre diferentes períodos de monitoramento, devido ao manejo do solo, pois o revolvimento e o tráfego de máquinas e implementos agrícolas alteram a estrutura do solo, resultando em modificações no tamanho dos agregados, aumento da densidade, redução da porosidade total e conseqüente

aumento da distribuição de poros pequenos em relação aos poros grandes. O espaço poroso de um solo é essencial para o crescimento de raízes e para a movimentação da água e do ar no solo. A compactação do solo afeta a CRAS, porque causa uma redução da porosidade total do solo em função do aumento da densidade do solo. Sendo assim, o conteúdo de água retido na saturação (tensão aplicada igual a 0hPa) e na macroporosidade (tensão aplicada de 60hPa) diminuem (SOUZA *et al.*, 2005; URACH, 2007). Sales *et al.* (2009) observaram que a macroporosidade é o atributo físico do solo mais sensível as intervenções decorrentes do manejo em Neossolos.

Streck *et al.* (2018) afirmam que os Neossolos são solos de formação recente, desenvolvidos a partir de diversos materiais de origem e encontrados em diversas condições de relevo e drenagem. De maneira geral, são solos que apresentam restrições para culturas anuais, devido à sua pouca profundidade efetiva para o armazenamento de água e desenvolvimento de raízes, além de possuírem muita pedregosidade e afloramentos rochosos.

Sales *et al.* (2009) ressaltam que a manutenção da cobertura vegetal do solo é considerada a medida-chave para exploração agropecuária em Neossolos. Em virtude destas particularidades, Soares (2018) comenta que os agricultores da região de Canguçu-RS enfrentam problemas de conservação do solo devido ao seu uso intensivo e a falta de práticas conservacionistas. Esse problema associado à produção de fumo em áreas de alta fragilidade ambiental, de declividade acentuada e de solos rasos, aumenta a suscetibilidade à degradação, diminuindo a qualidade física do solo, a conservação dos recursos naturais e, conseqüentemente, a capacidade de produção agrícola.

4.8. Modelo de Van Genuchten-Mualem

De Jong Van Lier (2020) ressalta que o modelo matemático mais utilizado para descrever as propriedades hidráulicas do solo, inclusive a sua retenção de água, é a equação de Van Genuchten (1980):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha * |\psi_m|)^n]^m} \quad (2)$$

onde, $\theta(h)$: conteúdo de água no solo retido em um determinado potencial matricial (ψ_m) expresso em módulo; θ_s : conteúdo de água retido na saturação ($\psi_m = 0$ hPa); θ_r : conteúdo de água residual; α : fator de escala da CRAS; n e m : parâmetros de ajustes da equação 2.

Utilizando a Equação 2 em conjunto com a teoria apresentada por Mualem (1976), Van Genuchten (1980) descreve que é conveniente fazer a restrição paramétrica demonstrada na Equação 3.

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (3)$$

Ao combinar as Equações 2 e 3 obtém-se a Equação 4, conhecida como Equação de Van Genuchten-Mualem (VGM) (DE JONG VAN LIER, 2020).

$$\psi_m(\theta) = \alpha^{-1} \left\{ \left[\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right]^{n/(n-1)} - 1 \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

onde, $\psi_m(\theta)$ corresponde ao valor do potencial matricial em um dado valor do conteúdo de água retido no solo.

4.9. Indicadores da qualidade física do solo

A qualidade de um solo pode ser avaliada pelo comportamento espaço-temporal dos seus atributos físicos, biológicos e químicos, os quais dependem de fatores intrínsecos, como o tipo de solo, e extrínsecos, como o manejo adotado pelo produtor. Vários atributos têm sido utilizados para inferir sobre a qualidade de um solo, tais como:

- a quantidade de macroporos, que indica, mesmo que indiretamente, a habilidade do solo drenar o excesso de água e facilita o desenvolvimento radicular. (REYNOLDS *et al.*, 2002; DREWRY e PATON, 2005; PULIDO-MONCADA *et al.*, 2014a; TIMM *et al.*, 2020);
- a densidade do solo, utilizada como indicador indireto de aeração, estruturação e capacidade de armazenar e transmitir água (REYNOLDS *et al.*, 2002, 2009; TIMM *et al.*, 2020),

- a resistência do solo a penetração, que indica o quanto o solo está compactado (MOHIEDDINNE *et al.*, 2019);
- a capacidade de aeração, que indica a capacidade de armazenamento de ar no espaço poroso do solo (REYNOLDS *et al.*, 2009);
- a capacidade de água disponível, que indica a capacidade do solo armazenar e fornecer água para as raízes das plantas (REYNOLDS *et al.*, 2009; PULIDO-MONCADA *et al.*, 2014a; YU *et al.*, 2015; BACHER *et al.*, 2019; TIMM *et al.*, 2020);
- a condutividade hidráulica do solo saturado, que indica o quão facilmente o solo transmite a água e os solutos (DREWRY e PATON, 2005; PULIDO-MONCADA *et al.*, 2014a; YU *et al.*, 2015);
- o carbono orgânico do solo, é um indicador da qualidade química e biológica do solo, atuando indiretamente na QFS (REYNOLDS *et al.*, 2009); e
- o índice S, que indica a porosidade do solo, sua distribuição e geometria através da inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo (DEXTER, 2004a, 2004b, 2004c; DEXTER e CZYŻ, 2007).

No entanto, segundo Armindo e Wendroth (2016) as análises qualitativas de variáveis físicas, químicas ou biológicas são difíceis e frequentemente ambíguas. Os índices de qualidade física do solo não são uma exceção a esta regra. Não há nenhum parâmetro ou índice revelador único que permita avaliar a estrutura do solo. No entanto, em sistemas de produção de biomassa de alta intensidade, os índices de qualidade física do solo são ferramentas úteis para decisões de manejo porque indicam a sustentabilidade da dinâmica da matéria orgânica do solo, drenagem, infiltração, transferência de calor e processos de armazenamento.

Armindo (2013) e Armindo e Wendroth (2016, 2019) propuseram novos índices como alternativa para avaliar as energias de aeração e de retenção associadas a estrutura física do solo, sendo eles o índice absoluto de aeração do solo (Aa), o índice absoluto de retenção de água (WRa), o índice relativo de aeração do solo (Ar), o índice relativo de retenção de água no solo (WRr) e o índice do potencial relativo ar-água do solo (AWr). Segundo eles, a qualidade física do solo não deve ser inferida limitando sua análise a um único ponto de uma função hidráulica e sim utilizar vários pontos ou a totalidade da função, fato corroborado por Pulido-Moncada *et al.* (2014b).

Armindo e Wendroth (2016, 2019) ainda afirmam que estes índices poderão ser uma ferramenta útil para identificar as diferenças na QFS, servindo como “fatores

de desempate” em situações nas quais a análise da QFS utilize outros indicadores e os resultados finais sejam valores semelhantes. Bacher *et al.*, (2019) dizem que o índice AW_r é um indicador dinâmico e sensível, capaz de captar mudanças temporais na QFS, podendo ser utilizado em diferentes escalas temporais e espaciais como uma ferramenta útil de gestão de terras.

Estes índices são fundamentados na integral da curva de retenção da água no solo (CRAS) e na relação entre a densidade de fluxo de água (q) e a condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}). Quanto mais comprimida for a CRAS em relação ao eixo do conteúdo de água no solo, menor será a energia destinada a retenção de água no solo.

Armindo e Wendroth (2016, 2019) ainda salientam que o solo deve apresentar simultaneamente capacidade de aeração, de retenção de água e propriedades de transporte que garantam o fluxo de água para atender a demanda hídrica das plantas. Desta maneira são assumidas quatro premissas:

- i)* Um solo “virgem” que sustenta uma mata nativa pode possuir um padrão desejado de qualidade física;
- ii)* Para que um projeto de drenagem seja eficiente, o solo deve possuir elevados índices de aeração;
- iii)* Um solo a ser cultivado com culturas anuais deve possuir quantidades suficientes de água e ar para suprir as necessidades hídricas e de aeração das mesmas; e
- iv)* O efeito da matéria orgânica e da resistência do solo a penetração na qualidade física do solo estará sempre diretamente relacionado com a CRAS.

Mesmo considerando estas quatro premissas básicas, ainda é complexo estabelecer um padrão de qualidade física do solo, sendo praticamente impossível abranger todas as variáveis que envolvem os usos do solo, pois a QFS desejada para um plantio de arroz é diferente da QFS desejada para um plantio de eucalipto, por exemplo.

5. Material e Métodos

5.1. Caracterização do local de estudo

O estudo foi conduzido na bacia hidrográfica da sanga Ellert (BHSE), uma sub-bacia hidrográfica da bacia hidrográfica do arroio Pelotas. A BHSE é localizada inteiramente no município de Canguçu, região Sul do estado do Rio Grande do Sul (Figura 5). Esta bacia foi selecionada em virtude da importância social e econômica para o município de Canguçu, onde a agricultura familiar predomina na maioria das propriedades rurais. Segundo o IBGE (2010) a população de Canguçu residente em áreas rurais representa 63% da população total do município, correspondendo a 33,565 mil pessoas, sendo sua economia baseada na produção de fumo, milho, leite, suínos e aves.

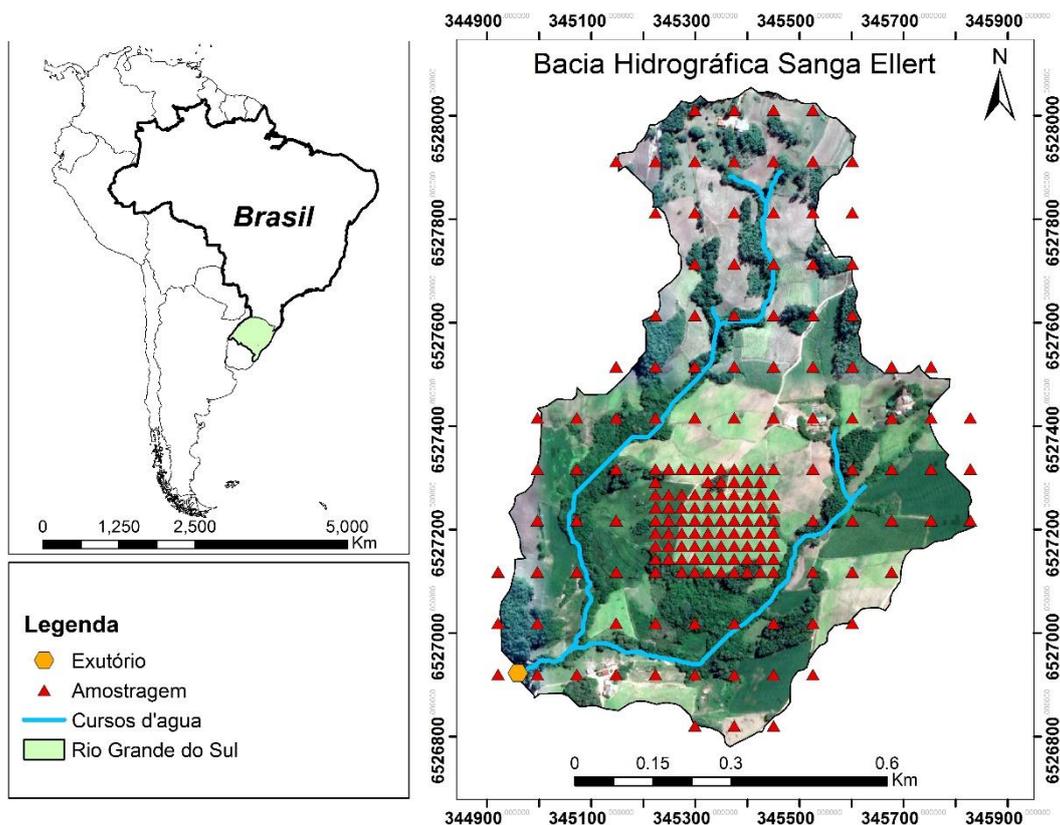


Figura 5 - Localização, topografia, hidrografia e malha amostral da bacia hidrográfica sanga Ellert (BHSE).

Para a elaboração do modelo digital de elevação (MDE) foi realizado um levantamento plani-altimétrico onde foram demarcados 1000 pontos cotados (Figura 6) utilizando uma estação total modelo SET630RK da marca Sokkia, auxiliada pelos receptores GNSS modelo Hiper Life+ da marca Topocon.

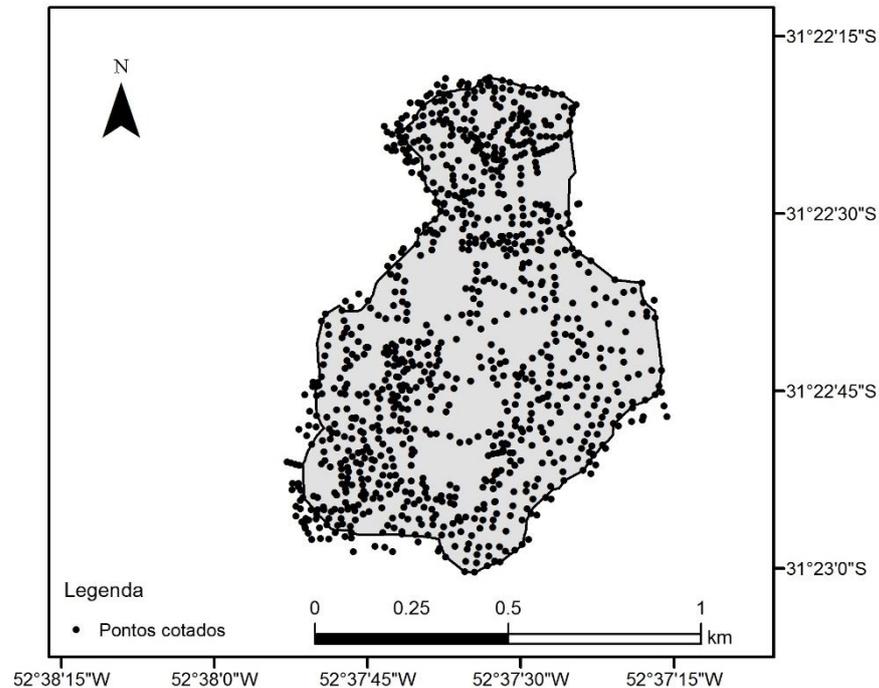


Figura 6 - Pontos cotados nas campanhas de campo na bacia hidrográfica da Santa Ellert, para geração do modelo digital de elevação do terreno. Fonte: Veber (2016).

De posse desta informação e com auxílio de informações do IBGE (1986), foi possível constatar que a BHSE possui 0,66 km² de área a montante da seção de controle, altitude entre 310,9 a 419,4 m, relevo regional variando de ondulado a forte ondulado e a vegetação natural sendo composta pelo predomínio de vegetação de mata ou arbustiva rala. Também foi possível observar que os solos são rasos e esparsos, localizados entre afloramentos rochosos, compreendendo basicamente a classe de Neossolos, identificados por Soares *et al.* (2020) através do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018).

Durante o levantamento topográfico inicial a campo realizado por Soares (2018) foram identificados quatro diferentes tipos de usos do solo: culturas anuais, mata nativa, silvicultura e pastagem que ocupavam 59%, 17%, 14% e 10%, respectivamente, da área da bacia.

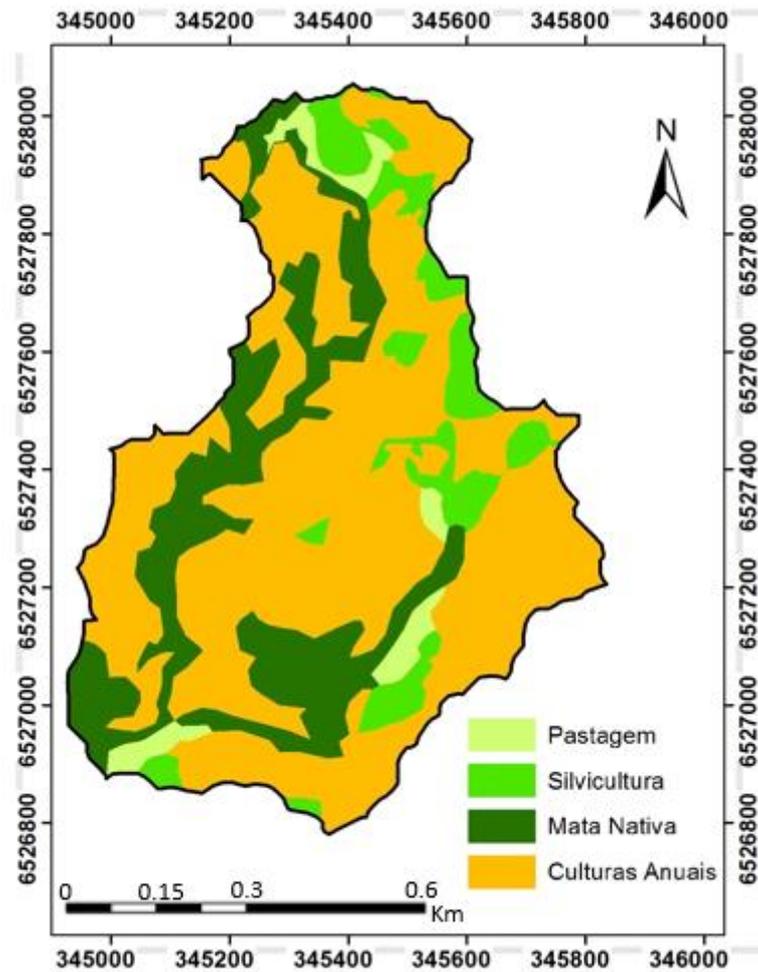


Figura 7 - Usos do solo da bacia hidrográfica sanga Ellert (BHSE).

5.2. Delimitação da malha experimental

Para o estabelecimento da malha amostral e a obtenção das coordenadas UTM de cada ponto, utilizou-se o software ArcGIS (ESRI, 2014). A malha amostral (Figura 5C) foi delimitada com pontos espaçados de 50 m na direção oeste por 75 m na direção sul, contabilizando 106 pontos amostrais na primeira bateria de coletas de amostras solo. Posteriormente, a fim de melhor capturar e descrever a estrutura de variabilidade espacial dos atributos físico-hidráulicos do solo em distâncias menores que a estabelecida (50 m x 75 m), foi implementado um adensamento amostral na parte central da área da bacia, coletando mais 78 pontos, espaçados de 25 m entre si em ambas as direções, totalizando 184 pontos amostrais em toda a área da bacia. A demarcação de cada ponto na área da BHSE foi realizada com equipamento GPS de navegação.

5.3. Amostragem de solo e análises laboratoriais

Em cada ponto amostral, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada na camada de 0-0,20 m, sendo determinados os seguintes atributos físico-hidráulicos do solo: densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total. Estas análises foram realizadas por Soares (2018) nos Laboratórios de Pedologia e Física do Solo da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), campus Cerro Largo – RS. As amostras com estrutura preservada também foram utilizadas para determinar a curva de retenção da água no solo em cada ponto amostral (conteúdo de água no solo retido nas tensões de 10; 20; 60; 100; 33; 1000; 3000 e 15000 hPa).

As amostras foram saturadas com água por ascensão capilar gradual e, posteriormente, submetidas às tensões de 0 a 100 hPa na mesa de tensão (Figura 3). A tensão de 60 hPa foi adotada como o limite de separação entre a macroporosidade e a microporosidade do solo. Os conteúdos de água retidos nas tensões de 33, 1000, 3000 e 15000 hPa foram determinados por meio da câmara de pressão de Richards (Figura 4). A porosidade total foi considerada igual ao conteúdo de água na amostra de solo quando saturada (Teixeira *et al.*, 2017). Desta forma, foi elaborada uma CRAS experimental para cada ponto amostral.

Cada CRAS experimental foi ajustada ao modelo matemático de van Genuchten (1980) (equação 2 usada em conjunto com a restrição apresentada na equação 3) por meio do script escrito em linguagem R desenvolvido por Armindo e Wendroth (2016) (Anexo A).

A partir de cada modelo ajustado de CRAS, foram obtidos os conteúdos volumétricos de água na saturação (θ_s), na capacidade de campo (θ_{cc}) e no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}). A partir disso, calcula-se a aeração (α_D) que é igual a porosidade drenável ou livre de água, determinada pela diferença ($\alpha_D = \theta_s - \theta_{cc}$) (ARMINDO e WENDROTH 2016, 2019; REICHARDT e TIMM, 2020). Os valores do conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{cc}) foram obtidos a partir da metodologia de Prevedello (1999), usando o script apresentado no Anexo A.

O primeiro índice proposto por Armindo e Wendroth (2016) é o índice absoluto de aeração do solo (A_a) (Equação 5) representado geometricamente pela área de cor preta na Figura 8. Este índice quantifica a energia associada à gravidade para drenar a água no solo de θ_s para θ_{cc} . Se o valor de A_a for pequeno, o trabalho

energético realizado pela gravidade para drenar a água é pequeno e, provavelmente, o solo atinge a θ_{cc} rapidamente.

$$Aa = \int_{\theta_{cc}}^{\theta_s} h(\theta) d\theta \quad (5)$$

onde, Aa é o índice absoluto de aeração do solo (hPa), θ_s é o conteúdo de água retido no ponto de saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e θ_{cc} é o conteúdo de água no solo referente a capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

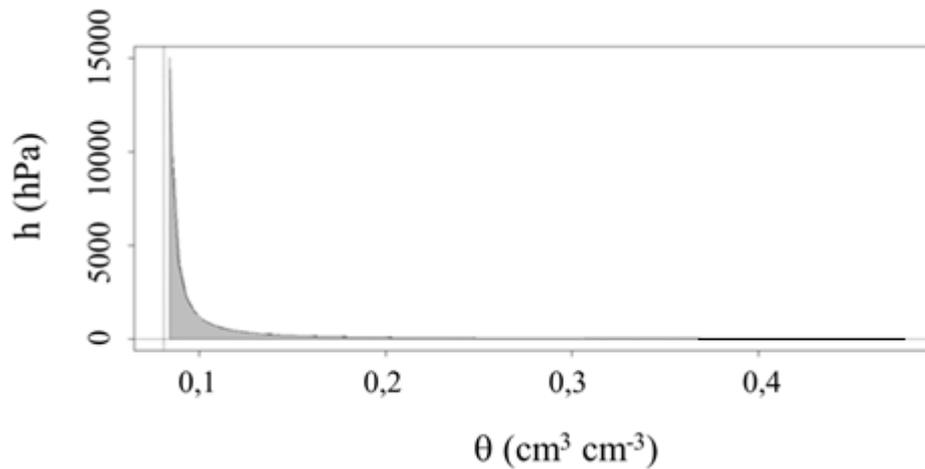


Figura 8 - Representação geométrica das integrais definidas das CRAS para os índices de energia hidráulica propostos por Armindo (2013) e Armindo e Wendroth (2016, 2019).

O segundo índice proposto é o índice absoluto de retenção de água (WRa) (Equação 6) representado geometricamente pela área de cor cinza na Figura 8. Este índice quantifica a energia associada a retenção de água entre θ_{cc} e θ_{pmp} .

$$WRa = \int_{\theta_{pmp}}^{\theta_{cc}} h(\theta) d\theta \quad (6)$$

onde, WRa é o índice absoluto de retenção de água no solo (hPa).

O terceiro índice proposto é o índice relativo de aeração do solo (Ar), demonstrado na Equação 7, que pode ser calculado antes e após qualquer manejo realizado.

$$Ar = 100 \frac{\int_{\theta_{cc}}^{\theta_s} h(\theta) d\theta}{\int_{\theta_{pmp}}^{\theta_s} h(\theta) d\theta} \quad (7)$$

onde, Ar é o índice relativo de aeração do solo (%)

O quarto índice proposto é o índice relativo de retenção de água no solo (WRr), conforme demonstrado na Equação 8.

$$WRr = 100 \frac{\int_{\theta_{pmp}}^{\theta_{cc}} h(\theta) d\theta}{\int_{\theta_{pmp}}^{\theta_s} h(\theta) d\theta} \quad (8)$$

onde, WRr é o índice relativo de retenção de água do solo (%)

O quinto índice proposto (Equação 9) compara a energia de aeração do solo em relação a energia de retenção para disponibilizar água para os vegetais (AWr), quantificando o equilíbrio entre estas energias, sendo geometricamente representado pela relação entre as áreas de cor preta e de cor cinza (Figura 8) sob a CRAS.

$$AWr = 100 \frac{\int_{\theta_{cc}}^{\theta_s} h(\theta) d\theta}{\int_{\theta_{pmp}}^{\theta_{cc}} h(\theta) d\theta} \quad (9)$$

onde, AWr é o índice do potencial relativo ar-água do solo (%)

5.4. Metodologia estatística empregada

Primeiramente, os 184 pontos amostrais foram analisados individualmente para observar possíveis inconsistências durante o processo de coleta de dados a campo e posteriores análises laboratoriais. Sendo assim, devido à ausência de algumas informações essenciais para a posterior análise estatística, 14 pontos amostrais foram retirados para não influenciarem no cálculo dos cinco índices de

energia hidráulica (Aa , Wra , Ar , WRr e AWr) (equações 5 a 9) e no ajuste dos parâmetros da CRAS (θ_s , θ_r , α , n). Portanto, as informações contidas nas 170 CRAS restantes foram processadas usando o script em R (Anexo A).

Posteriormente, os resultados obtidos foram submetidos à estatística descritiva, onde foram calculadas as medidas de posição (média aritmética e mediana), de dispersão (desvio padrão, variância e coeficiente de variação) e os indicadores do formato da distribuição (coeficientes de assimetria e curtose). Também foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk (S-W), a 5% de significância, para analisar a normalidade de cada conjunto de dados. Razali e Wah (2011) afirmam que o teste de S-W é o teste de normalidade mais robusto e Pedrosa *et al.* (2015) comentam que este teste funciona melhor em conjuntos amostrais de aproximadamente 50 amostras e não em conjuntos menores, conforme fora afirmado anteriormente por Yazici e Yolacan (2007), mesmo assim o teste de Shapiro-Wilk continua apresentando bons resultados para amostras menores ($n < 50$) e também para amostras superiores ($n > 50$).

Além dos resultados entre 0 (não-normalidade) e 1 (normalidade) obtidos no teste, também existe o *p-valor* que, segundo Larson e Farber (2009), é a probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais extrema que aquela observada em uma amostra, sob a hipótese nula. Os mesmos autores dizem que apenas é possível afirmar que um conjunto de dados possui distribuição normal quando o mesmo possuir 30 ou mais pontos amostrais. Assim, não é possível definir com precisão a tendência de normalidade nos tipos de usos de solo identificados como Pastagem (11 pontos amostrais), Silvicultura (21 pontos amostrais) e Mata Nativa (17 pontos amostrais).

Além disso, foram elaborados *box-plots* (gráficos em caixa) para verificar a presença ou não de dados discrepantes (*outliers*) nos conjuntos de dados. Do ponto de vista estatístico, um *outlier* pode ser produto de um erro de observação ou de arredondamento (LARSON e FARBER, 2009; MORETTIN e BUSSAB, 2017). O gráfico em caixa agrega uma série de informações a respeito da distribuição de um conjunto de dados, tais como posição, dispersão, assimetria, caudas e dados discrepantes (PIANA *et al.*, 2009). Para a sua construção, considera-se um retângulo onde são representados os quartis (Q1 e Q3) e a mediana (Md). A partir do retângulo, para cima e para baixo, seguem linhas, denominadas bigodes, que vão até os valores adjacentes. O(s) menor(es) e o(s) maior(es) valor(es) não

discrepantes de um conjunto de dados são considerados adjacentes inferior(es) e superior(es), respectivamente. Eles não ultrapassam a cerca superior (CS) e a cerca inferior (CI). Os valores discrepantes recebem uma representação individual por meio de uma letra ou símbolo. A Figura 9 ilustra as informações obtidas por meio de um gráfico em caixa.

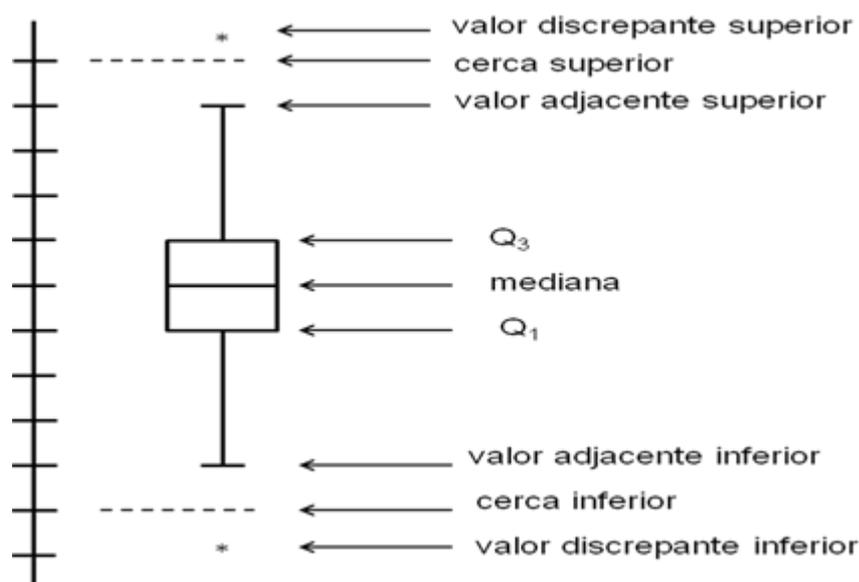


Figura 9 - Gráfico em caixa (*box-plot*) ilustrando as informações a respeito da distribuição de um conjunto de dados. Fonte: Reichardt e Timm (2016).

O delineamento experimental adotado na análise de variância (ANOVA) foi o inteiramente casualizado desbalanceado (número de pontos amostrais em cada tratamento diferente), sendo aplicado o teste F (p-valor de 5%) para comparação da variância dos diferentes tipos de uso do solo. Quando o teste F foi significativo (p-valor calculado menor ou igual a 5%), foi aplicado o teste de Tukey, a 5% de significância, para a comparação entre as médias de cada atributo físico-hidráulico e de cada índice de energia hidráulica dos diferentes tratamentos (tipos de usos do solo) (COPENHAVER e HOLLAND, 1988).

A posteriori, foi realizada a análise de correlação de Spearman, a qual foi selecionada por não ser sensível a assimetrias e *outliers* (RESTREPO e LOPEZ, 2007; WINTER *et al.*, 2016). Para a correta interpretação dos valores calculados, utilizou-se os critérios de interpretação apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Interpretação do coeficiente de correlação de Spearman

Tamanho da Correlação	Interpretação
0,90 a 1,00	Correlação extremamente alta e positiva
0,70 a 0,90	Correlação alta e positiva
0,50 a 0,70	Correlação moderada e positiva
0,30 a 0,50	Correlação pequena e positiva
0,00 a 0,30	Correlação insignificante e positiva
0,00 a -0,30	Correlação insignificante e negativa
-0,30 a -0,50	Correlação pequena e negativa
-0,50 a -0,70	Correlação moderada e negativa
-0,70 a -0,90	Correlação alta e negativa
-0,90 a -1,00	Correlação extremamente alta e negativa

Adaptado de Hinkle; Wiersma; Jurs (2003).

Também foi realizada a análise de agrupamento, que consiste na classificação não-supervisionada dos atributos físico-hídricos e dos índices para cada tipo de uso de solo, formando agrupamentos (*clusters*) em forma de um dendrograma a partir de distâncias euclidianas. Esta análise envolve a organização de um conjunto de padrões em *clusters*, de acordo com alguma medida de similaridade, ou seja, um algoritmo que “clusteriza” dados, classifica eles em conjuntos de dados que “se assemelham” de alguma forma - independentemente de classes predefinidas (JAIN *et al.*, 1999). Sendo utilizado o método UPGMA (SOKAL; MICHENER, 1958), o qual segundo Cruz *et al.* (2011) utiliza médias aritméticas das medidas de dissimilaridade, evitando caracterizar a dissimilaridade por valores extremos entre os objetos, fazendo com que a construção dos dendrogramas seja estabelecida pelos modelos ajustados de menor dissimilaridade.

Para complementar a análise estatística foi realizada a Análise dos Componentes Principais (ACP), a qual segundo Hair Junior *et al.* (2009) analisa as inter-relações entre um grande número de variáveis com o objetivo de encontrar um meio de condensar as informações contidas nos dados originais em um conjunto menor de variáveis estatísticas (componentes) com uma perda mínima de informação, ou seja, é uma técnica estatística de análise multivariada que transforma linearmente um conjunto original de variáveis, inicialmente

correlacionadas entre si, num conjunto menor de variáveis não correlacionadas que contém a maior parte da informação do conjunto original (HONGYU *et al.*, 2015).

Para a realização destas análises foram utilizados os programas computacionais R-Project (R Core Team, 2020), Past (HAMMER *et al.*, 2001) e Gretl (GRETL, 2020).

6. Resultados e Discussão

6.1. Análise Exploratória

Analisando a Tabela 2 observa-se que o menor valor médio de densidade do solo foi encontrado no tipo de uso Mata Nativa ($D_s = 1,24 \text{ g cm}^{-3}$), enquanto que o maior foi encontrado na área cultivada com Culturas Anuais ($D_s = 1,45 \text{ g cm}^{-3}$).

Os maiores valores médios de porosidade total (PT = 53,2%) e macroporosidade (Mac = 32,8%) foram encontrados na Mata Nativa seguidos pelos valores de PT = 49,3% e Mac = 28,3% na área com Silvicultura (Tabela 2). Os solos sob uso de Mata Nativa apresentam maior heterogeneidade de espécies vegetais na camada de 0-0,20 m de profundidade, fazendo com que existam diversos tipos e tamanhos de raízes que contribuem para uma melhor aeração do solo, maior contribuição da fauna edáfica e maior quantia de material orgânico nessa camada (LI *et al.*, 2020). Além disso, foi constatada menor movimentação de gado bovino e não foi detectada movimentação de máquinas agrícolas dentro da mata nativa, pois ambos contribuem para a ocorrência de uma maior compactação do solo.

O fato de a macroporosidade média dos usos florestais ser mais elevada que a encontrada nos outros tipos de usos corrobora com os resultados obtidos no estudo de Sekucia *et al.* (2020).

O valor médio da microporosidade do solo na camada de 0-0,20m variou pouco entre os diferentes tipos de usos do solo (Tabela 2), resultado também encontrado em Neossolos por Aires *et al.* (2019).

Tabela 2 - Parâmetros físico-hídricos obtidos a partir de amostras de solo coletadas em regiões da BHSE ocupadas pelos diferentes usos do solo.

	Culturas Anuais				Mata Nativa			
	Ds	PT	Mic	Mac	Ds	PT	Mic	Mac
\bar{X}	1,45	45,27	20,28	24,99	1,24	53,15	20,41	32,74
Med	1,45	45,45	20,22	26,38	1,32	50,22	19,24	32,10
S	0,14	5,14	4,11	6,93	0,26	9,72	5,59	7,62
CV	0,09	0,11	0,20	0,28	0,21	0,18	0,27	0,23
Curt.	1,24	1,23	-0,62	-0,03	-1,24	-1,23	2,58	-0,66
Ass.	-0,44	0,45	0,37	-0,43	-0,36	0,36	1,40	0,36
S-W	0,98	0,98	0,97	0,97	0,91	0,92	0,88	0,95
p-valor	0,06	0,06	0,01	0,02	0,12	0,13	0,03	0,53
	Silvicultura				Pastagem			
	Ds	PT	Mic	Mac	Ds	PT	Mic	Mac
\bar{X}	1,34	49,26	20,95	28,32	1,41	46,92	23,22	23,70
Med	1,33	49,73	20,32	27,49	1,39	47,41	21,84	23,88
S	0,20	7,36	7,22	7,72	0,12	4,61	6,12	6,59
CV	0,14	0,15	0,34	0,27	0,09	0,10	0,26	0,28
Curt.	-0,08	-0,10	6,88	0,95	0,98	0,93	-0,54	-0,25
Ass.	-0,60	0,59	2,43	0,71	-0,56	0,53	0,60	0,20
S-W	0,95	0,95	0,74	0,94	0,88	0,88	0,94	0,97
p-valor	0,34	0,34	0,00	0,27	0,10	0,11	0,52	0,86

Ds: Densidade do solo (g cm^{-3}); PT: Porosidade Total (%); Mic: Microporosidade (%) ; Mac: Macroporosidade (%); \bar{X} : Média; Med: Mediana; S: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de Variação, Curt: Curtose, Ass: Assimetria, S-W: Teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de significância e p-valor: Probabilidade de significância.

A maior variabilidade (CV = 20,8%) dos dados de Ds em torno da média foi encontrada no tipo de uso Mata Nativa, enquanto que a menor (CV = 8,7%) foi encontrada no tipo de uso Pastagem. Este mesmo comportamento do CV também foi encontrado para os dados de porosidade total. Já o maior valor de CV (CV = 34,5%) para os dados de microporosidade foi encontrado no tipo de uso Silvicultura, enquanto o menor (CV = 20,3%) no solo cultivado com Culturas Anuais. A variação dos valores de CV (23,3% - Mata Nativa a 27,8% - Pastagem) para os dados de macroporosidade foi relativamente pequena quando comparada com a variação de CV nos demais tipos de uso do solo (Tabela 2).

Com relação ao comportamento dos coeficientes de assimetria (Tabela 2), pode ser verificado que a distribuição dos dados de Ds foi classificada como assimétrica negativa em todos os tipos de usos do solo. Já as distribuições dos dados de PT e Mic foram classificadas como assimétrica positiva em todos os tipos de usos do solo. A distribuição dos dados de macroporosidade foi classificada como assimétrica negativa no solo cultivado com Culturais Anuais e assimétrica positiva para os demais usos.

Com base nos resultados do teste de Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade (Tabela 2), as distribuições dos dados de Mic e Mac no solo cultivado com Culturas Anuais não seguiram a tendência de normalidade (p -valor $< 0,05$). Nos tipos de usos Silvicultura e Mata Nativa somente os dados de microporosidade não seguiram a tendência de normalidade, enquanto que no tipo de uso Pastagem todas as distribuições dos dados seguiram a tendência de normalidade (p -valor $> 0,05$).

Já na Tabela 3 é possível observar que o procedimento de ajuste das curvas experimentais de retenção de água no solo ao modelo proposto por van Genuchten (1980) para os quatro diferentes tipos de usos do solo resultou em baixos valores do erro padrão residual (RSE), o que expressa que o modelo de van Genuchten (1980) descreveu de forma adequada o comportamento da relação conteúdo de água no solo-potencial matricial na camada de 0-0,20 m independentemente do tipo de uso no solo. Estes resultados corroboram com os encontrados por Rebouças (2016) e vários outros pesquisadores na literatura, ou seja, o modelo de van Genuchten, de uma maneira geral, descreve adequadamente o comportamento da retenção de água no solo para a maioria dos solos.

Tabela 3 - Parâmetros da CRAS obtidos a partir de amostras de solo coletadas em regiões ocupadas pelos diferentes usos do solo.

	Culturas Anuais								Mata Nativa							
	θ_s	θ_r	α	n	RSE	hcc	θ_{cc}	θ_{pmp}	θ_s	θ_r	α	n	RSE	hcc	θ_{cc}	θ_{pmp}
\bar{X}	0,4664	0,0765	0,3002	1,4176	0,0089	13,1240	0,3617	0,0996	0,5348	0,1087	0,2687	1,5557	0,0104	15,6790	0,3863	0,1205
Med	0,4673	0,0754	0,1512	1,4324	0,0084	10,2500	0,3532	0,0943	0,5009	0,1026	0,1338	1,6492	0,0110	13,5460	0,4011	0,1111
S	0,0558	0,0352	0,5109	0,1373	0,0039	10,0710	0,0557	0,0291	0,0964	0,0638	0,4076	0,1804	0,0041	13,0720	0,0670	0,0569
CV	0,1197	0,4601	1,7021	0,0968	0,4398	0,7674	0,1539	0,2923	0,1803	0,5873	1,5169	0,1160	0,3989	0,8337	0,1736	0,4723
Curt.	1,8533	0,4612	24,6810	-0,5646	1,9189	1,6249	-0,3772	0,8906	-1,1969	0,2633	9,4921	-1,0769	-1,1148	3,1380	-1,2060	0,4504
Ass.	-0,0513	0,1407	4,7265	0,1937	1,0918	1,1985	0,2910	0,7849	0,4218	0,5682	3,2189	-0,4284	-0,3411	1,6665	-0,0489	0,8630
S-W	0,9723	0,9825	0,4417	0,9829	-	0,9092	0,9863	0,9626	0,9166	0,9722	0,5180	0,9139	-	0,8434	0,9465	0,9353
p-valor	0,0129	0,1160	0,0000	0,1258	-	0,0000	0,2581	0,0018	0,1295	0,8550	0,0000	0,1164	-	0,0085	0,4033	0,2664
	Silvicultura								Pastagem							
	θ_s	θ_r	α	n	RSE	hcc	θ_{cc}	θ_{pmp}	θ_s	θ_r	α	n	RSE	hcc	θ_{cc}	θ_{pmp}
\bar{X}	0,5169	0,0894	0,2020	1,5562	0,0117	17,3320	0,3736	0,1038	0,4720	0,0996	0,1481	1,5670	0,0086	28,2700	0,3447	0,1163
Med	0,5074	0,0927	0,1313	1,5263	0,0111	13,4470	0,3595	0,0993	0,4737	0,0842	0,0816	1,6150	0,0078	22,8160	0,3334	0,0920
S	0,0820	0,0413	0,1730	0,2326	0,0055	13,3570	0,0738	0,0354	0,0441	0,0551	0,1882	0,1983	0,0041	19,0440	0,0765	0,0593
CV	0,1587	0,4615	0,8561	0,1494	0,4693	0,7706	0,1976	0,3413	0,0935	0,5528	1,2705	0,1266	0,4823	0,6736	0,2218	0,5099
Curt.	-0,8392	0,1310	-0,4380	0,9150	-1,1371	-0,9844	0,0565	-0,0395	0,8241	-1,0927	2,0119	-0,4182	0,2052	-1,3626	1,0607	-1,5971
Ass.	0,4422	0,1465	0,9775	0,9037	0,3950	0,5321	0,4500	0,6055	0,3959	0,5686	1,8396	-0,5605	0,9472	0,0372	1,0348	0,1542
S-W	0,9374	0,9698	0,8287	0,9286	-	0,9000	0,9644	0,9509	0,8943	0,8988	0,6587	0,9298	-	0,9377	0,8886	0,8901
p-valor	0,1938	0,7284	0,0019	0,1289	-	0,0345	0,6090	0,3537	0,1575	0,1785	0,0001	0,4089	-	0,4941	0,1334	0,1397

Onde, θ_s : Umidade no ponto de saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_r : Umidade residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); α : Fator de escala da CRAS; n: Parâmetro de forma; RSE: Erro padrão residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); hcc: Altura da coluna de água na capacidade de campo (cm); θ_{cc} : Umidade na capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_{pmp} : Umidade no ponto de murchamento permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), \bar{X} : Média; Med: Mediana; S: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de Variação, Curt: Curtose, Ass: Assimetria, S-W: Teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de significância e p-valor: Probabilidade de significância.

Também pode ser constatado na Tabela 3 que no solo sob uso de Mata Nativa foram encontrados os maiores valores médios de θ_s ($0,5348 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_r ($0,1087 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_{cc} ($0,3863 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e θ_{pmp} ($0,1205 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), demonstrando que nesse uso do solo existe uma maior capacidade de retenção e armazenamento de água.

No solo sob uso de Culturas Anuais foram encontrados os menores valores médios de θ_s ($0,4664 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_r ($0,0765 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), h_{cc} ($13,1240 \text{ cm}$) e θ_{pmp} ($0,0996 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e o segundo menor valor de θ_{cc} ($0,3617 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) (Tabela 3), demonstrando que nesse uso existe uma menor capacidade de retenção e armazenamento de água, sendo possível identificar claramente os efeitos das ações antrópicas nos parâmetros da curva de retenção de água no solo, i.e., as operações de preparo e cultivo do solo na camada de 0-0,20 m de profundidade diminuem os valores dos atributos físico-hidráulicos relacionados a retenção de água no solo.

No solo com plantio silvicultural foram observados parâmetros com desempenho inferior a mata nativa e superior aos outros usos do solo, enquanto no solo sob uso de Pastagem foram encontrados os menores valores médios de θ_{cc} ($0,3447 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), o segundo menor valor médio de θ_s ($0,4720 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e as segundas maiores médias de θ_r ($0,0996 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e θ_{pmp} ($0,1163 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) (Tabela 3), corroborando com o observado e discutido na Tabela 2.

Em todos os usos do solo a θ_s apresentou baixa variação (CV de 9,35% a 18,03%) enquanto a θ_r apresentou altas variações (CV de 46,01% a 58,73%) e os valores médios ajustados para o parâmetro n , que reflete a forma da curva de retenção de água no solo, foram praticamente similares nos tipos de uso Mata Nativa (1,5557), Silvicultura (1,5562) e Pastagem (1,5670) (Tabela 3), demonstrando que no uso de Culturas Anuais existe uma menor inclinação da CRA e conseqüentemente uma menor concentração de poros na sua faixa mais estreita, resultado sendo corroborado pelos valores observados na Tabela 2.

Com relação ao comportamento dos coeficientes de assimetria, excetuando-se o parâmetro α que apresentou comportamento assimétrico positivo para todos os usos, destacam-se as assimetrias positivas na h_{cc} para os solos sob uso de Culturas Anuais e Mata Nativa e na θ_{cc} para os solos com Pastagens (Tabela 3)

Os resultados do teste de Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade demonstram que a θ_s e a θ_{pmp} para as Culturas Anuais, a h_{cc} para a Mata Nativa e Silvicultura e

o parâmetro α para todos os usos não apresentaram tendência a normalidade (Tabela 3).

O solo sob uso de Culturas Anuais demonstrou os menores valores médios dos índices Aa (0,7102 hPa cm³ cm⁻³), Ar (0,5671 %) e AWr (0,5741 %) e os maiores valores médios dos índices WRa (167,8900 hPa cm³ cm⁻³) e WRr (99,4330 %) (Tabela 4). Isto significa que este é o tipo de uso do solo que a planta dispense uma maior quantidade de energia para retirar água do solo e menor energia para atingir a θ_{cc} , sendo o uso onde existe o maior desequilíbrio entre estas energias. Estes resultados são explicados devido aos processos de preparo do solo para o plantio, fazendo com que algumas partes do solo acabem sendo mais compactadas, aumentando sua densidade e quantidade de microporos (FERRO *et al.*, 2014; XING *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2020), fazendo com que a fração do espaço poroso disponível para a movimentação de água no solo seja menor. Por outro lado, a macroporosidade é maior que a observada nas pastagens pois mesmo ocorrendo a compactação do solo devido ao peso das máquinas agrícolas também existe o processo de gradagem durante a preparação do solo, que faz com que aumente o número de macroporos, promovendo uma melhor infiltração da água.

Também é possível constatar na Tabela 4 que no tipo de uso Mata Nativa foi encontrado o menor valor médio de Wra (120,2000 hPa cm³ cm⁻³), o que significa que as plantas necessitam uma menor quantidade de energia para retirar a água dos poros da matriz do solo neste tipo de uso quando comparado com os demais.

O solo sob uso de Silvicultura apresentou as segundas maiores médias dos índices Aa, Wra, Ar e AWr (Tabela 4). Possivelmente, estes resultados foram encontrados devido a alguns fatores como a homogeneidade do plantio de *Eucalyptus spp.* que ocupam este espaço, fazendo com que exista um certo padrão de tipos e tamanhos de raízes que contribuem para uma maior aeração do solo e também a maior presença da fauna edáfica e maior quantidade de matéria orgânica na camada de 0-0,20 m de profundidade.

Tabela 4 - Índices de energia hidráulica obtidos a partir de amostras de solo coletadas em regiões da BHSE ocupadas pelos diferentes usos do solo.

	Culturas Anuais					Mata Nativa				
	Aa	Wra	Ar	WRr	AWr	Aa	Wra	Ar	WRr	AWr
\bar{X}	0,7102	167,8900	0,5671	99,4330	0,5741	1,2052	120,2000	1,3641	98,6360	1,3981
Med	0,5190	159,2600	0,3834	99,6170	0,3849	0,9369	103,3100	1,2858	98,7140	1,3026
S	0,5977	60,9370	0,6070	0,6070	0,6204	1,0513	59,9690	1,2350	1,2350	1,2803
CV	0,8416	0,3630	1,0704	0,0061	1,0806	0,8723	0,4989	0,9053	0,0125	0,9158
Curt.	0,8924	-0,4459	2,7903	2,7903	2,9517	1,4353	-0,3743	-0,7170	-0,7170	-0,6678
Ass.	1,0678	0,4722	1,6700	-1,6700	1,7070	1,3190	0,8156	0,6792	-0,6792	0,7094
S-W	0,9006	0,9707	0,8150	0,8150	0,8102	0,8775	0,8891	0,8921	0,8921	0,8892
p-valor	0,0000	0,0093	0,0000	0,0000	0,0000	0,0289	0,0447	0,0503	0,0503	0,0449
	Silvicultura					Pastagem				
	Aa	Wra	Ar	WRr	AWr	Aa	Wra	Ar	WRr	AWr
\bar{X}	1,3301	136,9200	1,8377	98,1620	1,9678	1,8923	137,3500	1,8564	98,1440	1,9158
Med	1,0290	120,7600	0,6655	99,3350	0,6700	2,1172	124,3500	1,5372	98,4630	1,5612
S	1,1452	73,1440	2,9419	2,9419	3,3553	1,3214	70,8950	1,5841	1,5841	1,6593
CV	0,8610	0,5342	1,6009	0,0300	1,7051	0,6983	0,5162	0,8533	0,0161	0,8661
Curt.	-1,0736	-0,5526	8,8596	8,8596	9,8809	-1,1272	2,5221	-0,9471	-0,9471	-0,9165
Ass.	0,5563	0,6494	2,9556	-2,9556	3,1450	0,0410	1,7211	0,5410	-0,5410	0,5761
S-W	0,8827	0,9157	0,6076	0,6076	0,5730	0,9447	0,8003	0,9125	0,9125	0,9084
p-valor	0,0164	0,0713	0,0000	0,0000	0,0000	0,5777	0,0095	0,2611	0,2611	0,2336

Onde, Aa: Índice absoluto do potencial de aeração do solo ($\text{hPa cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Wra: Índice absoluto de retenção de água no solo ($\text{hPa cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Ar: Índice do potencial relativo de aeração do solo (%); WRr: Índice do potencial relativo de retenção de água do solo (%); AWr: Compara o potencial total de aeração do solo em relação ao potencial total de retenção de água aos vegetais (%); \bar{X} : média; Med: mediana; S: desvio padrão; CV: coeficiente de variação, Curt: Curtose, Ass: Assimetria, S-W: Teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de significância e p-valor: Probabilidade de significância.

No solo sob pastagem foram encontrados os maiores valores médios dos índices Aa (1,8923 hPa cm³ cm⁻³), Ar (1,8564 %) e AW_r (1,9158 hPa cm³ cm⁻³) e os menores valores médios do índice WR_r (98,1440 %) (Tabela 4). Estes resultados podem ser atribuídos ao pisoteio do gado bovino (VZZOTTO *et al.*, 2000), o que faz com que a parte superficial do solo seja mais compactada e assim aumente a quantidade de microporos e conseqüentemente aumente a D_s (TEFERI *et al.*, 2016; STOESSEL *et al.*, 2018). O comportamento observado nas tabelas 2 a 4 demonstra que neste tipo de uso existe um maior trabalho da gravidade para que a água se desloque entre o ponto de saturação e o ponto de capacidade de campo.

A Figura 10 apresenta os gráficos em caixa ilustrando o comportamento dos atributos físico-hidráulicos nos diferentes tipos de uso do solo.

A distribuição dos dados de θ_s apresenta maiores valores absolutos e maior variabilidade nos usos florestais, principalmente na Mata Nativa (Figura 10a), pois o comportamento das raízes nesse uso é mais heterogêneo, fazendo com que exista mais espaço poroso para o solo armazenar água. Enquanto no solo sob uso de Pastagem é visível a baixa variabilidade dos dados, mesmo com a presença de *outliers*.

A θ_r (Figura 10b) apresenta maior variabilidade em todos os usos devido a distribuição heterogênea dos poros do solo, principalmente a microporosidade (Figura 11c). A presença de alguns *outliers* nos solos sob Silvicultura e Culturas Anuais pode ser oriunda dos preparos destes solos para os respectivos plantios.

É nítido que os solos sob uso de Pastagem apresentaram maior variação de hcc (Figura 10c) em razão das diferentes intensidades de compactação do pisoteio do gado bovino. Enquanto nos locais com Culturas Anuais existe uma menor tensão aplicada em comparação com as áreas de Pastagem devido aos processos de preparo do solo que fazem com que esta camada superficial possua uma maior porosidade.

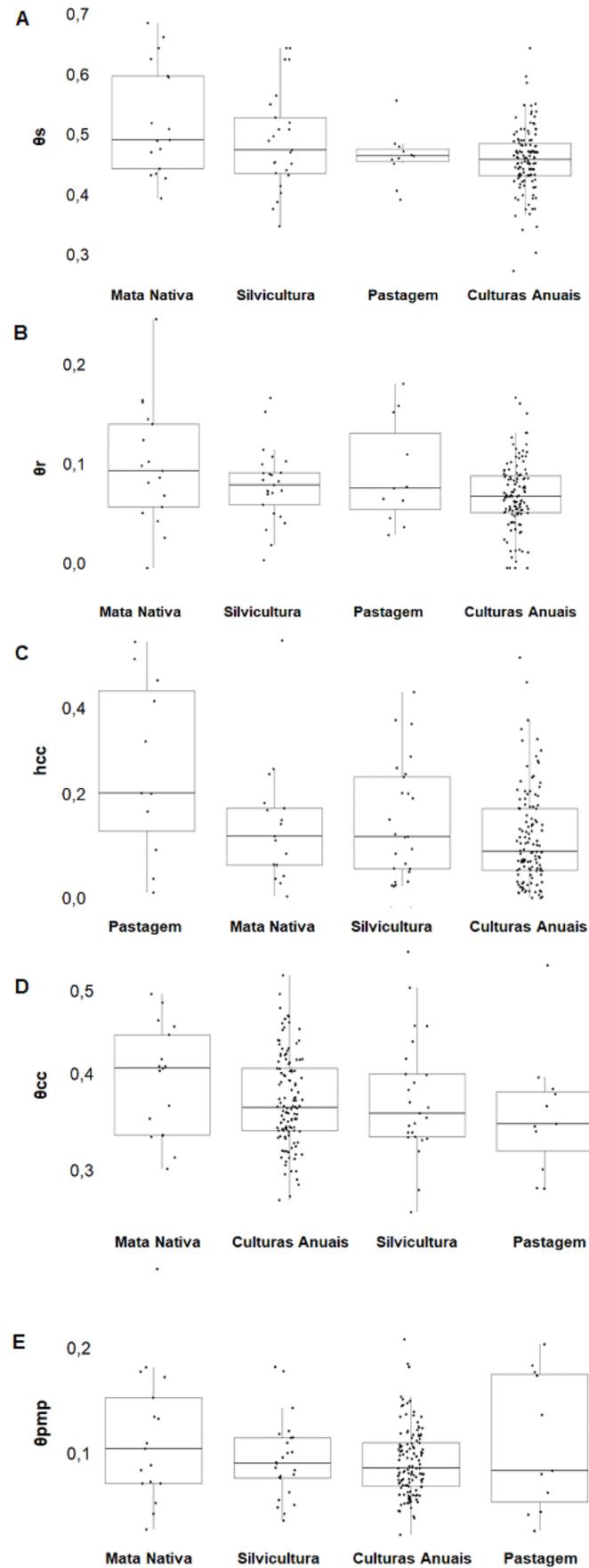


Figura 10 - Gráficos em caixa da umidade na saturação (θ_s); umidade residual (θ_r); tensão de água na capacidade de campo (h_{cc}); umidade na capacidade de campo (θ_{cc}); e umidade no ponto de

murcha permanente (θ_{pmp}) obtidos a partir de amostras coletadas em áreas com diferentes usos do solo.

O uso silvicultural apresentou o maior e o menor valor relativo da θ_{cc} (Figura 10d), sendo possivelmente explicado devido a heterogeneidade entre os talhões silviculturais. De maneira geral, os locais com Mata Nativa possuem uma distribuição menos variável que a dos outros usos. O *outlier* do solo sob Pastagem possivelmente é devido a um processo de alteração do tipo de uso do solo, fazendo com que este determinado local ainda possua algumas características do uso anterior.

A θ_{pmp} (Figura 10e) teve maior variação nos locais com pastagens, pois devido a maior compactação do solo e a menor atividade radicular faz com que existam mais microporos (Figura 11c), que estão diretamente ligados com a capacidade do solo reter água.

A D_s (Figura 11a) dos usos florestais apresentou maior variabilidade devido principalmente à ação heterogênea das raízes. Enquanto a variabilidade da D_s nas Culturas Anuais tem relação com as ações dos maquinários no preparo convencional do solo.

A maior amplitude da PT (Figura 11b) dos usos florestais, principalmente nos locais com Mata Nativa, é devido a heterogeneidade de tamanhos e tipos de raízes, além da maior atividade da fauna edáfica, os quais auxiliam no aumento da PT e conseqüentemente na diminuição D_s .

A Mic (Figura 11c) é maior principalmente nos locais sob Pastagem, favorecendo a retenção da água no solo. Sendo possível observar que a Silvicultura apresentou um *outlier*, sendo esta amostra localizada na bordadura do talhão e devido a sua localização pode ter sido afetado pelo preparo do solo para as culturas anuais.

Enquanto a Mac (Figura 11d) é maior nos usos florestais, favorecendo a movimentação da água no solo, ao passo que os locais com Culturas Anuais apresentaram uma distribuição heterogênea da Mac, tendendo a valores menores.

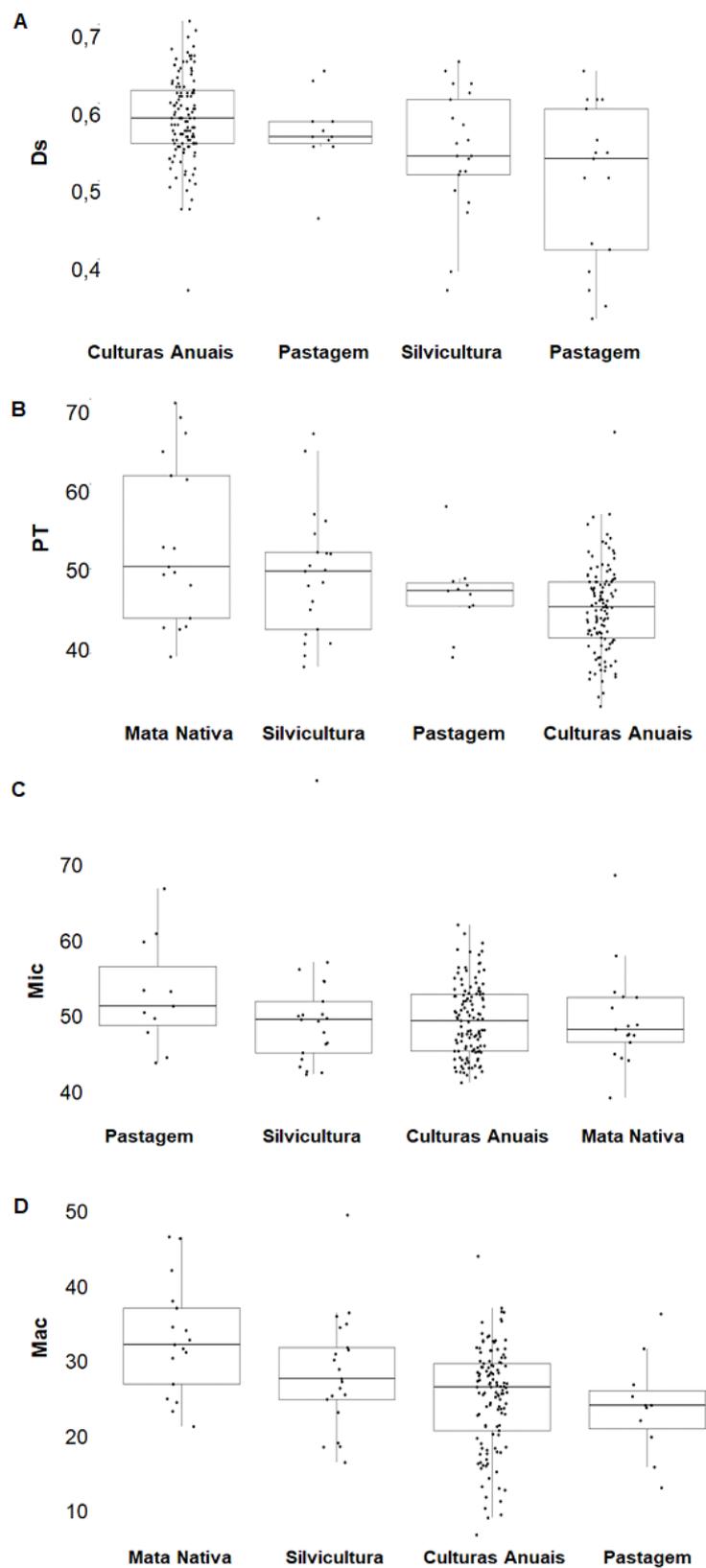


Figura 11 - Gráficos em caixa da densidade do solo (D_s); porosidade total (PT); microporosidade (Mic); e macroporosidade (Mac) obtidos a partir de amostras coletadas em áreas com diferentes usos do solo.

Na Figura 12a os valores do índice Aa apresentaram o comportamento esperado, sendo que nos locais sob Silvicultura e Culturas Anuais a maioria das amostras está localizada entre o terceiro quartil e o limite adjacente superior. Mesmo com a presença de alguns *outliers* nos locais sob Culturas Anuais, o valor mais discrepante está localizado em uma amostra de Mata Nativa, podendo ser explicado por ser um local onde o gado bovino se movimentou para ter acesso a água ou para descansar sob a sombra.

O comportamento da distribuição dos valores de WRa (Figura 12b) demonstra que de maneira geral os locais sob Mata Nativa gastam menor energia para retirar água dos poros estruturais do solo. Enquanto os locais sob uso de Culturas Anuais apresentam uma grande variação entre si e também demonstram que esse é o uso do solo onde existe um maior gasto energético da planta para retirar água do solo.

O índice Ar (Figura 12c) apresenta um comportamento ligeiramente homogêneo nos locais sob Culturas Anuais, mesmo com a presença de vários *outliers*. Enquanto nos outros usos do solo existe um comportamento relativamente parecido. O índice WRr (Figura 12d) também possui um comportamento ligeiramente homogêneo nos locais sob Culturas Anuais. Para ambos os índices existe um *outlier* na Silvicultura, que pode ser explicado devido a possibilidade do gado bovino ir abrigar-se dentro dos talhões, gerando uma maior compactação do solo naquela determinada região.

Já o índice AWr (Figura 12e), o qual quantifica o equilíbrio entre Ar e WRr, demonstra que a Pastagem é o uso onde existe maior equilíbrio entre as energias destinada a aeração e retenção de água, enquanto no solo sob Culturas Anuais existe maior desequilíbrio nesta relação.

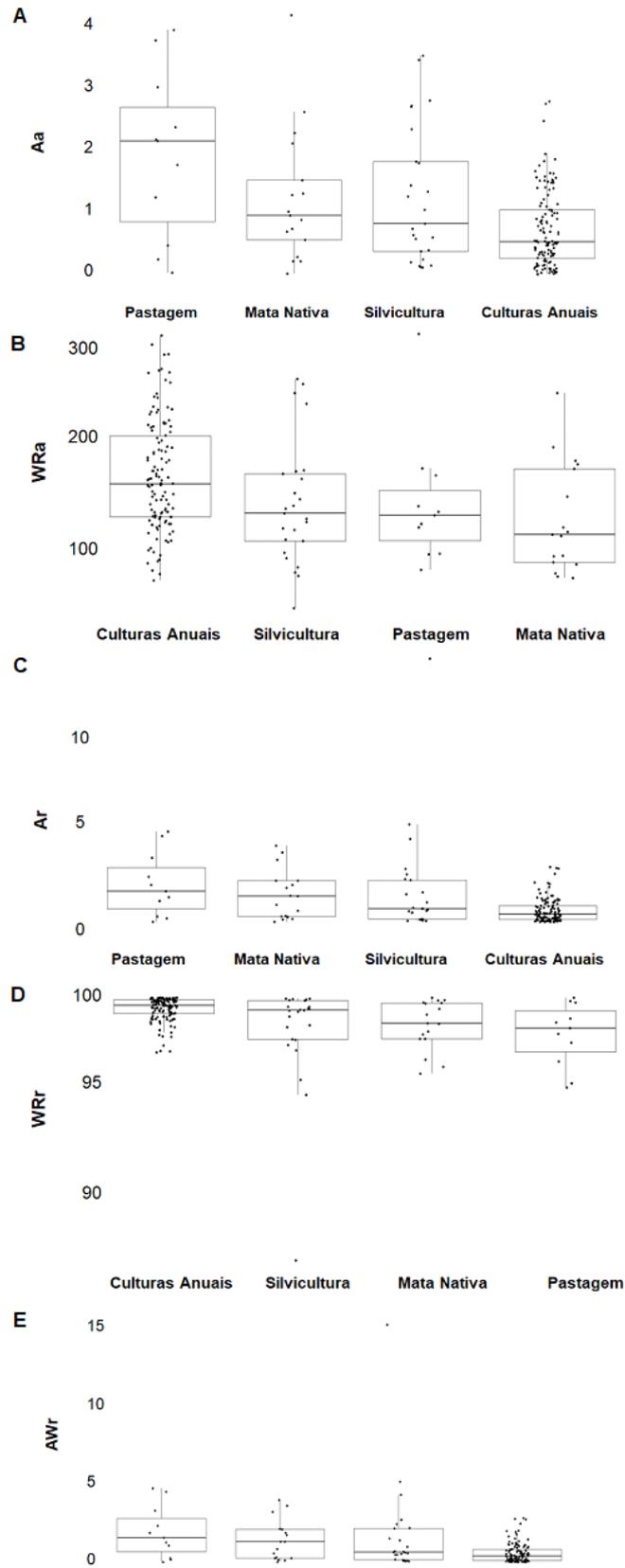


Figura 12 - Gráficos em caixa dos índices de energia-hidráulica absoluto de aeração (Aa); absoluto de retenção de água no solo (WRa); relativo de aeração (Ar); relativo de retenção de água no solo (WRr); relativo da relação ar-água do solo (AWr); obtidos a partir de amostras coletadas em áreas com diferentes usos do solo.

A figura 13 demonstra graficamente as CRAS com comportamentos representativos para cada uso. A saber, para o solo sob Culturas Anuais foi selecionada a CRAS do conjunto amostral 74 (Figura 13a), para a Mata Nativa foi selecionada a CRAS do conjunto amostral 18 (Figura 13b), para a Silvicultura foi selecionada a CRAS do conjunto amostral 102 (Figura 13c) e para a Pastagem foi selecionada a CRAS do conjunto amostral 88 (Figura 13d).

Sendo evidente graficamente o que foi observado nas Tabelas 2 a 4 e Figuras 10 a 12 e discutido anteriormente. Onde os locais com Mata Nativa apresentaram uma maior capacidade de armazenamento de água e menor gasto energético das plantas para absorver a água do solo, os locais com Pastagem apresentaram maior equilíbrio entre as energias de aeração e de retenção de água no solo, enquanto os locais com Culturas Anuais apresentaram o maior desequilíbrio entre essas forças.

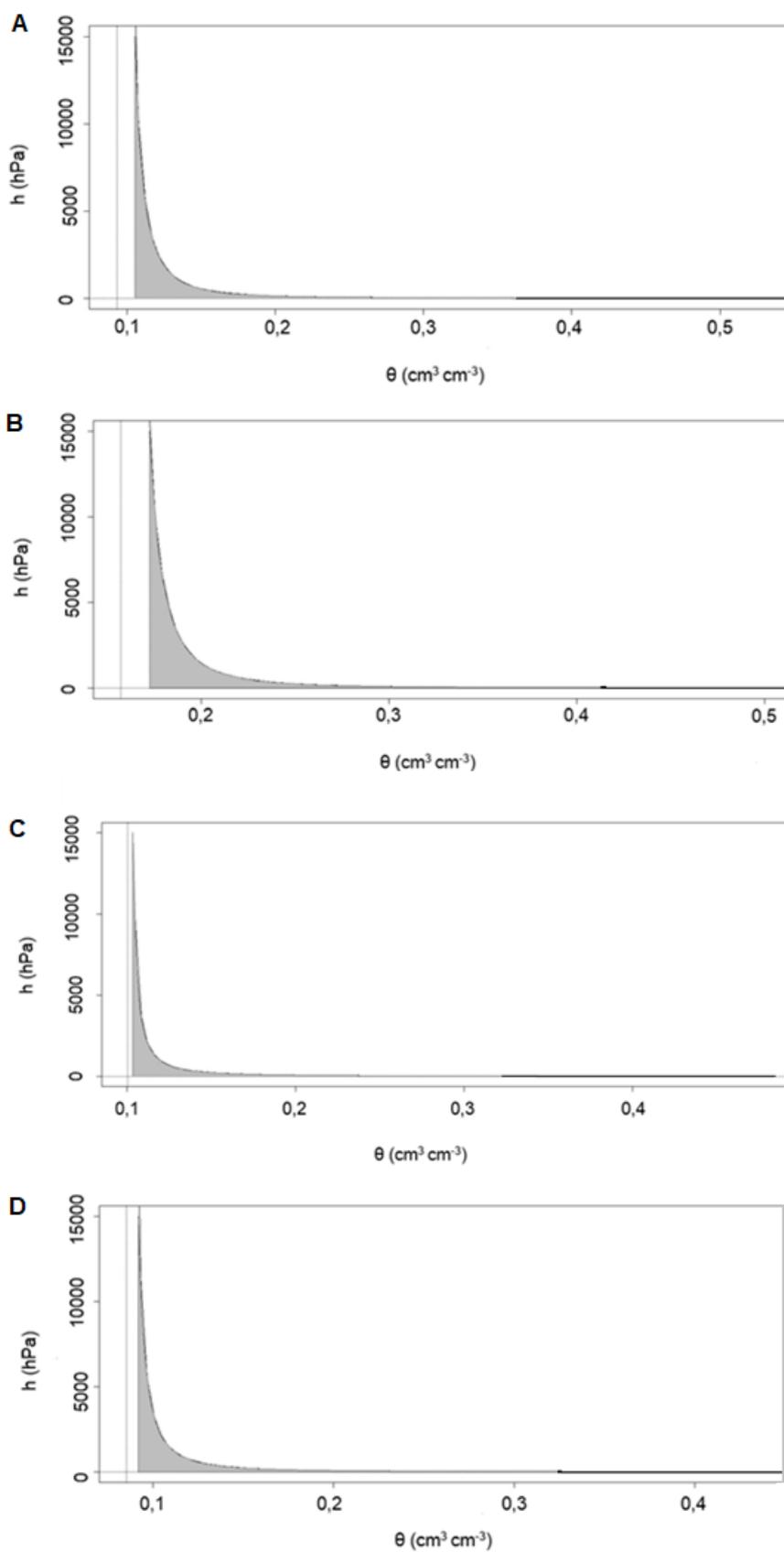


Figura 13 - CRAS características dos solos sob uso de Culturas Anuais (A); Mata Nativa (B); Silvicultura (C) e Pastagem (D).

6.2. Testes de Médias (F e Tukey)

De acordo com o teste F, a Ds (F=10,11 e p-valor=3,76E-06), a Mac (F=7,0740 e p-valor=0,0002) e a PT (F=10,12 e p-valor=3,714E-06) apresentaram diferença significativa entre as médias em função do uso do solo (Tabela 5). De maneira oposta, a Mic não diferiu estatisticamente em nenhum dos usos do solo (F=1,276 e p-valor=0,2842).

Na tabela 6, o teste de Tukey indicou que a Ds sob Culturas Anuais diferiu estatisticamente da Ds sob Mata Nativa e Silvicultura e a Ds sob pastagem diferiu estatisticamente da Ds sob Mata Nativa. Sendo explicado pela relação oposta que estes usos têm em relação a microporosidade e a macroporosidade.

A Mac sob Mata Nativa diferiu estatisticamente da Mac sob Culturas Anuais e sob Pastagem. Sendo novamente explicado pela heterogeneidade da Mata Nativa, a qual modifica a Mac através dos diferentes tamanhos de raízes, pela maior presença de matéria orgânica e pela ação da biota.

Já na PT sob Mata Nativa foram encontrados resultados parecidos com os encontrados por Evrendilek *et al.* (2004), onde ela diferiu da PT sob Culturas Anuais e sob Pastagem e a PT sob Silvicultura diferiu da PT sob Culturas Anuais.

Tabela 5 – Anova aplicada aos atributos físicos do solo.

	Ds					Mic				
	S.Q.	g.l.	Q.M.	F	p-valor	S.Q.	g.l.	Q.M.	F	p-valor
Entre grupos	0,7646	3	0,2549	10,1100	3,76E-06	91,0185	3	30,3395	1,2760	0,2842
Dentro de grupos	4,1865	166	0,0252			3945,7100	166	23,7694		
Total	4,9511	169				4036,7300	169			
	Mac					PT				
	S.Q.	g.l.	Q.M.	F	p-valor	S.Q.	g.l.	Q.M.	F	p-valor
Entre grupos	1064,3100	3	354,7710	7,0740	0,0002	1093,0600	3	364,3530	10,1200	3,714E-06
Dentro de grupos	8325,4600	166	50,1534			5979,0200	166	36,0182		
Total	9389,7700	169				7072,0800	169			

Onde, S.Q.: Soma de Quadrados; g.l.: Graus de Liberdade; Q.M.: Quadrado Médio, F: Teste F e p-valor: Probabilidade de significância.

Tabela 6 – Teste Tukey aplicado aos atributos físicos do solo.

	Ds				Mic			
	CA	MN	Silv	PST	CA	MN	Silv	PST
CA		6,298E-06*	0,0282*	0,8165	-	-	-	-
MN	7,1680		0,1967	0,0402*	-	-	-	-
Silv	3,9740	2,8110		0,7249	-	-	-	-
PST	1,2410	3,7880	1,4740		-	-	-	-
	Mac				PT			
	CA	MN	Silv	PST	CA	MN	Silv	PST
CA		0,0002*	0,1979	0,9385		6,258E-06*	0,0278*	0,8184
MN	5,9740		0,2256	0,0065*	7,1700		0,1915	0,0398*
Silv	2,8070	2,7090		0,3015	3,9800	2,8080		0,7213
PST	0,8176	4,6640	2,4750		1,2360	3,7940	1,4820	

Onde, CA: Culturas Anuais; MN: Mata Nativa; Silv: Silvicultura; PST: Pastagem; *: Diferenças significativas.

Tabela 7 - Anova aplicada para os índices de energia-hidráulica absolutos.

	Aa					WRa				
	S.Q.	g.l.	Q.M.	F	p-valor	S.Q.	g.l.	Q.M.	F	p-valor
Entre grupos	20,4932	3	6,8311	10,8800	1,466E-06	55656,2000	3	18552,1000	4,7670	0,0033
Dentro de grupos	104,2680	166	0,6281			646060,0000	166	3891,9300		
Total	124,7610	169				701717,0000	169			

Onde, S.Q.: Soma de Quadrados; g.l.: Graus de Liberdade; Q.M.: Quadrado Médio, F: Teste F e p-valor: Probabilidade de significância.

Tabela 8 – Teste Tukey para os índices de energia-hidráulica absolutos.

	Aa				WRa			
	CA	MN	Silv	PST	CA	MN	Silv	PST
CA		0.0823	0.0064*	2,927E-05*		0,0187*	0,0651	0,4069
MN	3.3850		0.9605	0.1168	4,1760		0,9491	0,8927
Silv	4.6710	0.6974		0.2334	3,5220	0,7638		0,9934
PST	6.6770	3.1680	2.6830		2,2000	1,0050	0,3754	

Onde, CA: Culturas Anuais; MN: Mata Nativa; Silv: Silvicultura; PST: Pastagem; *: Diferenças significativas.

Tabela 9 - Anova aplicada para os índices de energia-hidráulica relativos.

	Ar					WRr				
	S.Q.	g.l.	Q.M.	F	p-valor	S.Q.	g.l.	Q.M.	F	p-valor
Entre grupos	45,4566	3	15,1522	9,4300	8,663E-06	45,4570	3	15,1523	9,4300	8,662E-06
Dentro de grupos	266,7350	166	1,6068			266,7350	166	1,6068		
Total	312,1920	169				312,1920	169			

Onde, S.Q.: Soma de Quadrados; g.l.: Graus de Liberdade; Q.M.: Quadrado Médio, F: Teste F e p-valor: Probabilidade de significância.

Tabela 10 - Teste Tukey para os índices de energia-hidráulica relativos.

	Ar				WRr			
	CA	MN	Silv	PST	CA	MN	Silv	PST
CA		0,0778	0,0002*	0,0083*		0,0778	0,0002*	0,0083*
MN	3,4180		0,6565	0,7476	3,4180		0,6565	0,7476
Silv	5,9980	1,6320		1,0000	5,9980	1,6320		1,0000
PST	4,5550	1,4190	0,4468		4,5550	1,4190	0,4465	

Onde, CA: Culturas Anuais; MN: Mata Nativa; Silv: Silvicultura; PST: Pastagem; *: Diferenças significativas.

Tabela 11 - Anova para o índice AWr.

	AWr				
	S.Q.	g.l.	Q.M.	F	p-valor
Entre grupos	52,2049	3	17,4016	8,8880	1,7E-05
Dentro de grupos	325,0110	166	1,9579		
Total	377,2160	169			

Onde, S.Q.: Soma de Quadrados; g.l.: Graus de Liberdade; Q.M.: Quadrado Médio, F: Teste F e p-valor: Probabilidade de significância.

Tabela 12 - Teste Tukey para o índice AWr.

	AWr			
	CA	MN	Silv	PST
CA		0,1108	0,0002*	0,0146*
MN	3,2020		0,5921	0,7744
Silv	5,9600	1,7770		0,9996
PST	4,2950	1,3520	0,1513	

Onde, CA: Culturas Anuais; MN: Mata Nativa; Silv: Silvicultura; PST: Pastagem; *: Diferenças significativas.

Os índices Aa ($F=10,88$ e $p\text{-valor}=1,466E-06$) e WRa ($F=4,7670$ e $p\text{-valor}=0,0033$) apresentaram diferença entre as médias (Tabela 7), fazendo com que fosse realizado o teste Tukey para os mesmos. Sendo assim, na Tabela 8 o índice Aa para Culturas Anuais diferiu estatisticamente do Aa sob Silvicultura e Pastagem, sendo possível explicar principalmente devido a diferença entre a macroporosidade destes usos. Já o índice WRa apresentou diferença significativa sob Mata Nativa e Culturas Anuais, pois a Mata Nativa foi o uso onde as plantas gastam menos energia para retirar água dos poros do solo e as Culturas Anuais é o uso onde elas gastam mais energia neste processo.

O índice Ar (Tabelas 9 e 10) demonstrou os mesmos processos observados no índice Aa (Tabelas 7 e 8), nesta situação a explicação é dada pelo fato de o índice Ar ser a expressão do índice Aa relação a soma de Aa e WRa, pois como ambos representam uma pequena faixa de valores em relação ao todo das CRAS, a diferença de comportamento entre estes dois índices não costuma ser significativa. Da mesma forma, o índice WRr (Tabela 9 e 10) é a representação do índice WRa em relação a soma de Aa e WRa, ou seja, em porcentagem, porém estes índices não apresentaram necessariamente o mesmo comportamento, pois enquanto o WRa trata de valores, o WRr trata de proporções e assim ocorreu um comportamento diferente do observado nas Tabelas 7 e 8, sendo que neste índice (Tabelas 9 e 10) existe uma diferença significativa entre o solo sob Culturas Anuais em relação aos solos sob Silvicultura e Pastagem, sendo visível na Figura 12d que esta diferença é devido ao formato da distribuição dos dados.

Na tabela 11 o índice AWr também apresentou diferença entre as médias ($F=8,8880$ e $p\text{-valor}=1,7E-05$), para esse índice (Tabela 12) houve diferença significativa dos solos sob Culturas Anuais em relação a Silvicultura e a Pastagem, sendo explicado pelo comprimento destas distribuições, conforme pode ser observado na Figura 12e.

6.3 Teste de Correlação de Spearman

Independentemente do tipo de uso do solo, na Tabela 13 ficam claras as já esperadas correlações extremamente altas e negativas entre D_s e PT , o que significa que são parâmetros inversamente proporcionais, pois quanto maior a porosidade total menor é a densidade do solo (XING *et al.*, 2018), já que a densidade do solo representa a relação entre a massa de solo seco e o volume total ocupado; e a porosidade total do solo é a fração do volume total em um determinado volume de solo passível de ser ocupada por água ou ar (JONG VAN LIER, 2020). Da mesma maneira, outro resultado já esperado é a da correlação extremamente alta e negativa observada entre os índices A_r e WR_r , pois enquanto A_r representa o índice relativo de aeração do solo (Equação 7), WR_r representa o índice relativo de retenção de água no solo (Equação 8).

Outras relações extremamente altas e positivas observadas independentemente do tipo de uso do solo são a relação entre A_a e A_r (Equações 5 e 7) e a relação WR_a e WR_r (Equações 6 e 8), sendo diretamente proporcionais, pois o índice A_r é a expressão do índice A_a relação a soma de A_a e WR_a e o mesmo ocorre na relação entre os índices WR_a e WR_r . Sendo assim, é perceptível que de maneira geral o comportamento dos índices é mais afetado pelas atividades envolvidas em cada uso do solo do que apenas por um atributo físico-hídrico isolado.

Tabela 13 – Coeficiente de correlação de Spearman entre os atributos físico-hidráulicos e índices de energia hidráulica nos diferentes usos do solo.

Culturas Anuais									
	Aa	Ar	WRa	WRr	Awr	Ds	PT	Mic	Mac
Aa	1,0000	0,9621**	-0,6263**	-0,9621**	0,9621**	-0,1091	0,1091	0,1980*	-0,0769
Ar	-	1,0000	-0,7992**	-1,0000**	1,0000**	-0,0801	0,0801	0,0544	0,0001
WRa	-	-	1,0000	0,7992**	-0,7992**	0,0759	-0,0759	0,3216**	-0,2427**
WRr	-	-	-	1,0000	-1,0000**	0,0801	-0,0801	-0,0544	-0,0001
Awr	-	-	-	-	1,0000	-0,0801	0,0801	0,0544	-0,7629
Ds	-	-	-	-	-	1,0000	-1,0000*	0,1134	-0,7629**
PT	-	-	-	-	-	-	1,0000	-0,1134	0,7629**
Mic	-	-	-	-	-	-	-	1,0000	-0,6859**
Mac	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0000
Mata Nativa									
	Aa	Ar	WRa	WRr	Awr	Ds	PT	Mic	Mac
Aa	1,0000	0,9608**	-0,5515*	-0,9608**	0,9608**	-0,1936	0,1936	0,4093	-0,0882
Ar	-	1,0000	-0,6985**	-1,0000**	1,0000**	-0,1838	0,1838	0,3676	-0,0172
WRa	-	-	1,0000	0,6985**	-0,6985**	0,2108	-0,2108	-0,1520	-0,2083
WRr	-	-	-	1,0000	-1,0000**	0,1838	-0,1838	-0,3676	0,0172
Awr	-	-	-	-	1,0000	-0,1838	0,1838	0,3676	-0,0172
Ds	-	-	-	-	-	1,0000	-1,0000**	-0,5858*	-0,7917**
PT	-	-	-	-	-	-	1,0000	0,5858*	0,7917**
Mic	-	-	-	-	-	-	-	1,0000	0,1275
Mac	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0000
Silvicultura									
	Aa	Ar	WRa	WRr	Awr	Ds	PT	Mic	Mac
Aa	1,0000	0,9649**	-0,6403**	-0,9649**	0,9649**	0,0909	-0,0909	0,0831	-0,0883
Ar	-	1,0000	-0,7909**	-1,0000**	1,0000**	0,0013	-0,0013	0,1026	-0,0403
WRa	-	-	1,0000	0,7909**	-0,7909**	0,2156	-0,2156	-0,0688	-0,0429
WRr	-	-	-	1,0000	-1,0000**	-0,0013	0,0013	-0,1026	0,0403
Awr	-	-	-	-	1,0000	0,0013	-0,0013	0,1026	-0,0403

Ds	-	-	-	-	-	1,0000	-1.0000*	-0.1948	-0.6117**
PT	-	-	-	-	-	-	1,0000	0.1948	0.6117**
Mic	-	-	-	-	-	-	-	1,0000	-0.5260*
Mac	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0000
Pastagem									
	Aa	Ar	WRa	WRr	Awr	Ds	PT	Mic	Mac
Aa	1,0000	0.9636**	-0.6818*	-0.9636**	0.9636**	0.4091	-0.4091	0.3000	-0.8182**
Ar	-	1,0000	-0.8273**	-1.0000**	1.0000**	0.3909	-0.3909	0.2818	-0.7091*
WRa	-	-	1,0000	0.8273**	-0.8273**	-0.4909	0.4909	0.0091	0.3000
WRr	-	-	-	1,0000	-1.0000**	-0.3909	0.3909	-0.2818	0.7091*
Awr	-	-	-	-	1,0000	0.3909	-0.3909	0.2818	-0.7091*
Ds	-	-	-	-	-	1,0000	-1.0000**	-0.4909	-0.2182
PT	-	-	-	-	-	-	1,0000	0.4909	0.2182
Mic	-	-	-	-	-	-	-	1,0000	-0.6091*
Mac	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0000

Onde, Aa: Índice absoluto de aeração do solo ($\text{hPa cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Ar: Índice relativo de aeração do solo (%); WRa: Índice absoluto de retenção de água no solo ($\text{hPa cm}^3 \text{cm}^{-3}$); WRr: Índice relativo de retenção de água do solo (%); Awr: Compara o total de aeração do solo em relação ao potencial total de retenção de água aos vegetais; Ds: Densidade do solo; PT: Porosidade Total; Mic: Microporosidade; Mac: Macroporosidade e *:p-valor <0,05 e **:p-valor<0,01.

Nos locais sob cultivos anuais (Tabela 13) ocorre uma correlação alta e negativa entre a macroporosidade e a densidade do solo e de maneira inversa, ocorre uma correlação alta e positiva entre a macroporosidade e a porosidade total, sendo possível concluir que devido ao fato de também existir uma correlação alta e negativa entre o índice AW_r e a macroporosidade, nas culturas anuais a macroporosidade afeta diretamente o equilíbrio entre as energias de aeração e de retenção.

Já no solo sob uso de mata Nativa (Tabela 13) ocorre uma correlação alta e negativa entre a macroporsidade e a densidade do solo e de maneira inversa, ocorre uma correlação alta e positiva entre a macroporosidade e a porosidade total e além disso, também ocorre uma correlação moderada e negativa entre a microporosidade e a densidade do solo e de maneira inversa, ocorre uma correlação moderada e positiva entre a microporosidade e a porosidade total, sendo o comportamento físico esperado para este tipo de uso do solo, corroborando com o estudo de Martinkoski *et al.* (2017). Sendo assim, neste uso do solo os índices são menos afetados por uma grandeza específica e acabam sendo afetados pelas dinâmicas envolvidas em todo o processo.

Enquanto onde existe Silvicultura (Tabela 13) a macroporosidade apresentou correlação moderada e negativa com a densidade do solo e com a microporosidade e apresentou correlação moderada e positiva com a porosidade total, corroborando com o comportamento esperado para estas grandezas, sendo o mesmo comportamento observado por Sekucia *et al.* (2020) em ambiente florestal. Sendo assim, neste uso do solo os índices são menos afetados por uma grandeza específica e acabam sendo afetados pelas dinâmicas envolvidas em todo o processo.

No solo sob uso de Pastagem (Tabela 13) a macroporosidade apresentou correlações altas e negativas com os índices A_a e A_r, correlações altas e positivas com os índices WR_a e WR_r, e correlação moderada e negativa com a microporosidade. Sendo assim, neste uso a macroporosidade afeta diretamente e negativamente a energia de aeração do solo e afeta diretamente e positivamente a energia retenção de água, o que também explica sua relação moderadamente negativa com a microporosidade.

6.4. Análise de Agrupamentos

Tomando como linha de corte 70% da distância euclidiana total, sendo este valor adotado seguindo o critério utilizado por Braz *et al.* (2020), onde dizem que há pelo menos três requisitos para definir um agrupamento aceitável, sendo estes definidos como a clara separação entre os grupos resultantes; uma determinada coesão de pontos em torno do centro de um grupo e o menor número possível de grupos, desde que obedecem aos outros requisitos. Desta maneira, os dendrogramas dos quatros diferentes usos do solo (Figura 14) criaram alguns agrupamentos semelhantes.

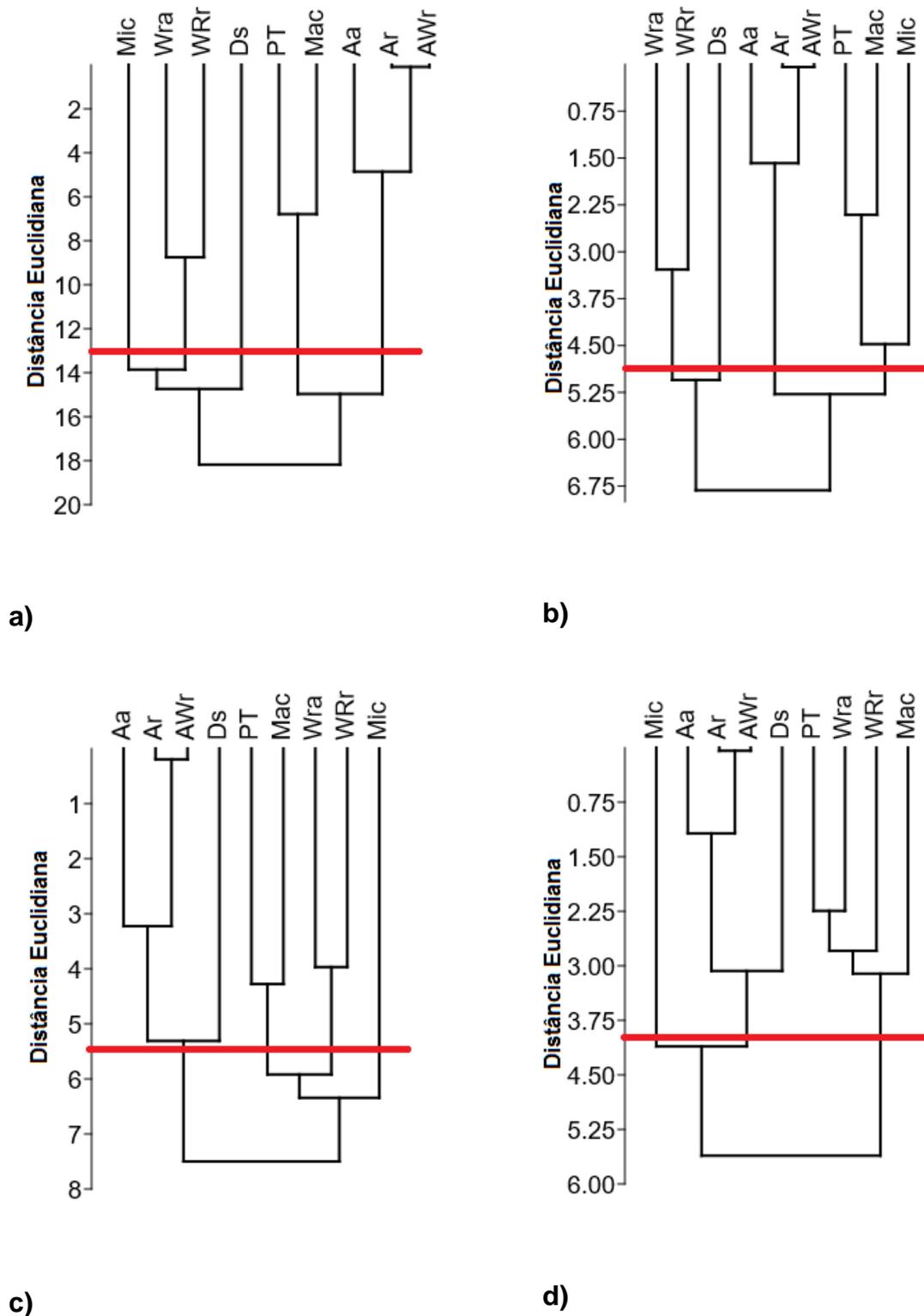


Figura 14 - Dendrograma para os diferentes usos do solo. a) Culturas Anuais; b) Mata Nativa; c) Silvicultura; d) Pastagem.

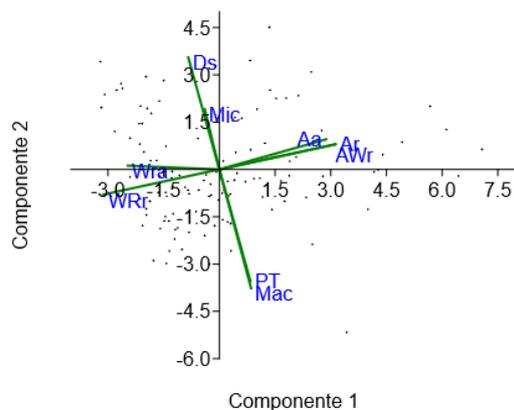
Em todos os usos do solo os índices Aa, Ar e AWR ficaram dentro de um mesmo agrupamento enquanto os índices WRa e WRr foram classificados em outro

grupo. Já as grandezas físico-hídricas PT e Mac afinizaram-se em um mesmo grupo, enquanto a Ds não foi inserida em nenhum agrupamento.

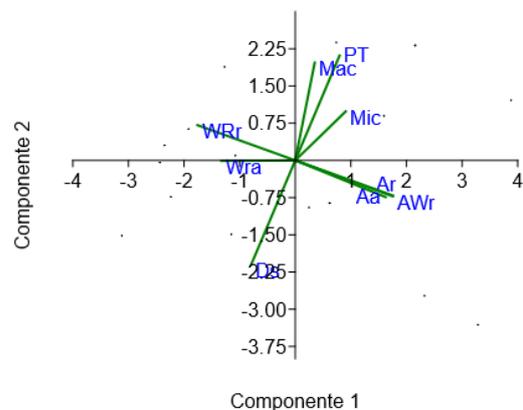
No caso do solo sob uso de Pastagem (Figura 14d) as grandezas físico-hídricas PT e Mac e os índices WRa e WRr fazem parte de um mesmo agrupamento, diferentemente dos outros usos onde estão em dois grupos diferentes. Já a microporosidade ficou isolada em três usos diferentes (Cultura Anuais, Silvicultura e Pastagem) e dentro do mesmo grupo da Mac e PT na Mata Nativa (Figura 14b). Possivelmente sendo explicado devido à grande heterogeneidade encontrada na Mata Nativa, fazendo com que exista uma maior variabilidade nos dados.

6.5. Análise dos Componentes Principais

Nos mapas de análise de componentes principais para os quatro diferentes usos (Figura 15) percebe-se em todos os usos alguns comportamentos já observados na análise exploratória, na correlação de Spearman e nos dendrogramas da análise de agrupamento, sendo os índices Aa, Ar e AWr correlacionados positivamente entre si e negativamente correlacionados com os índices WRa e WRr. Da mesma maneira, a PT é negativamente correlacionada com a Ds.



a)



b)

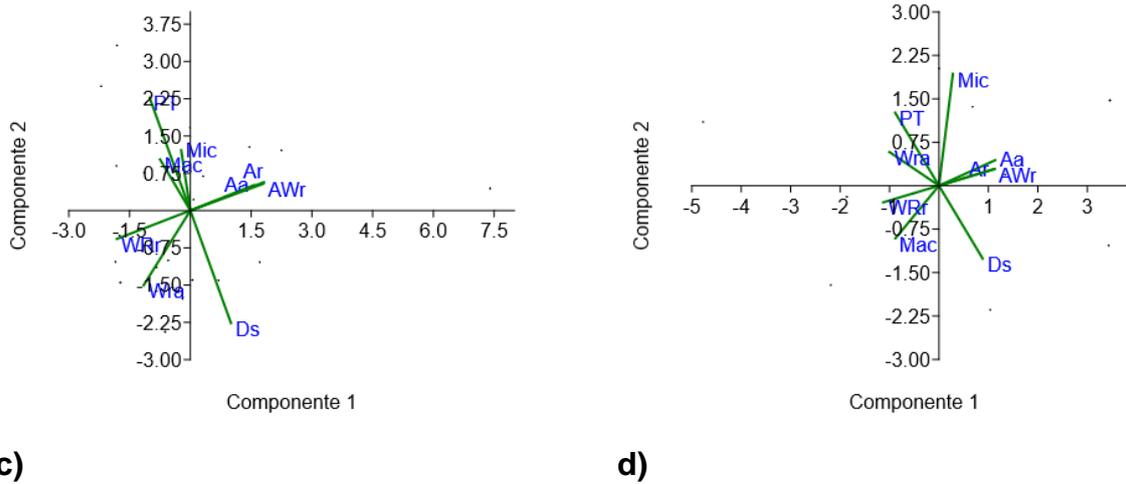


Figura 15 - Análise dos Componentes Principais para os diferentes usos do solo. a) Culturas Anuais; b) Mata Nativa; c) Silvicultura; d) Pastagem.

No mapa da análise dos componentes principais para as culturas anuais (Figura 15a), onde as componentes 1 e 2 representam respectivamente 49,28% e 31,51% da variância, além das relações já citadas também é demonstrada a correlação negativa entre a Mac e a Mic, a qual se explica devido a estes atributos serem inversamente proporcionais.

A partir do gráfico *biplot* dos componentes principais para a Mata Nativa (Figura 15b), onde as componentes 1 e 2 representam respectivamente 51,32% e 32,03% da variância, é possível observar uma correlação positiva entre Mac, Mic e PT. O que pode ser explicado devido a Mata Nativa ser heterogênea, onde existindo locais com a predominância de certo tipo de estrato e de espécies e outros locais com a predominância de estratos e espécies diferentes, o que modifica a matriz do solo, porém de uma maneira geral acaba existindo uma proporcionalidade entre os dois tipos de porosidade do solo, Rocha *et al.* (2020) também encontraram um comportamento parecido entre vários fragmentos de vegetação natural.

A partir do gráfico *biplot* da análise dos componentes principais para a Silvicultura (Figura 15c), onde as componentes 1 e 2 representam respectivamente 49,66% e 25,10% da variância, é demonstrada uma correlação positiva entre Mac, Mic e PT. O que pode ser explicado devido a Silvicultura ser homogênea, fazendo com que devido ao solo desta bacia hidrográfica ser raso, as raízes pivotantes e as raízes axiais tenham uma distribuição proporcional, contribuindo assim para esta proporcionalidade entre os tipos de porosidade.

A partir do gráfico *biplot* dos componentes principais para a Pastagem (Figura 15d), onde as componentes 1 e 2 representam respectivamente 65,27 % e 20,98 % da variância, além das relações já citadas também é demonstrada a correlação negativa entre a Mac e a Mic.

7. Conclusões

Os diferentes usos do solo promovem alterações em todas as grandezas físicos-hidráulicas do solo analisadas e os índices de energia hidráulica demonstraram satisfatoriamente algumas das principais características físico-hidráulicas do solo, sendo possível comparar a qualidade física dos quatro diferentes usos entre si.

As culturas anuais são o uso do solo com a maior densidade, onde é necessário um maior gasto energético das plantas para retirar água do solo e um menor gasto energético para atingir a θ_{cc} , sendo o uso onde existe o maior desequilíbrio entre estas energias.

Os locais com Mata Nativa além de possuírem comparativamente aos outros usos um melhor índice de aeração do solo, devido principalmente à sua maior macroporosidade, também possuem o melhor índice de retenção de água aos vegetais.

O solo sob Silvicultura apresentou um comportamento intermediário entre os solos sob Mata Nativa e os outros usos do solo.

Devido principalmente à sua menor macroporosidade, a Pastagem foi o uso que necessitou de maior trabalho do potencial gravitacional para drenar a água da saturação a capacidade de campo.

8. Considerações finais

Algumas sugestões para futuras discussões e possivelmente melhorar os resultados é realizar um inventário florestal, tanto na área silvicultural quanto na área de mata nativa, para conseguir uma melhor captação da distribuição vertical e horizontal das espécies vegetais que compõem os estratos florestais e assim correlacionar a evolução da qualidade física do solo durante diferentes estágios sucessionais da floresta.

Desta forma, este trabalho em conjunto com outros realizados na mesma bacia hidrográfica auxiliará no fomento dos diferentes meios de produção dos pequenos produtores rurais residentes nesta localidade, fazendo com que seja possível incrementar a produção rural de forma sustentável.

Referências

AIRES, E. S. *et al.* Alteração nos atributos físico-hídricos de um Neossolo flúvico sob manejo convencional e orgânico. **Water Resources And Irrigation Management**, Cruz das Almas, v. 8, n. 1-3, p. 5-17, dez. 2019.

ARCHER, N.A.L. *et al.* Soil characteristics and landcover relationships on soil hydraulic conductivity at a hillslope scale: A view towards local flood management. **Journal of Hydrology**, v. 497, p.208-222, 2013.

ARMINDO, R.A. Novos índices baseados no modelo de van Genuchten como indicadores da qualidade física do solo. **XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, Florianópolis, jul-ago. 2013.

ARMINDO, R.A.; WENDROTH, O. Physical Soil Structure Evaluation based on Hydraulic Energy Functions. **Soil Science Society Of America Journal**, v. 80, n. 5, p. 1167-1180, set. 2016

ARMINDO, R.A.; WENDROTH, O. Alternative approach to calculate soil hydraulic-energy-indices and -functions. **Geoderma**, v. 355, p. 1-8, dez. 2019.

BACHMANN, J.; PLOEG, R. R. van Der. A review on recent developments in soil water retention theory: interfacial tension and temperature effects. **Journal Of Plant Nutrition And Soil Science**, v. 165, n. 4, p. 468-477, ago. 2002.

BACHER, M. G. *et al.* Comparison of Soil Physical Quality Indicators Using Direct and Indirect Data Inputs Derived from a Combination of In-Situ and Ex-Situ Methods. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 83, n. 1, p. 5-17, jan. 2019.

BERNARDO, S; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. Ed. Atual. e Ampl. Viçosa: UFV, 2008. 625p.

BESKOW, S.; TIMM, L.C.; TAVARES, V.E.Q.; CALDEIRA, T.L.; AQUINO, L.S. Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the fragata river basin, southern brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 14, p. 2567-2578, jul. 2016.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elements of the Nature and Properties of Soils**. New Jersey: P. Hall, 1999. 559p.

BRAZ, A.M.; OLIVEIRA, I.J. de; CAVALCANTI, L.C. de S.; ALMEIDA, A.C. de; CHAVEZ, E.S. CLUSTER ANALYSIS FOR LANDSCAPE TYPOLOGY. **Mercator**, [S.L.], v. 19, n. 5, p. 1-16, 15 maio 2020. Mercator - Revista de Geografia da UFC.

COELHO, J.B.M.; BARROS, M.F.C.; BEZERRA NETO, E.; SOUZA, E.R. Ponto de murcha permanente fisiológico e potencial osmótico de feijão caupi cultivado em solos salinos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.7, p.708-713, 2014.

COPENHAVER, M.D.; HOLLAND, B. Computation of the Distribution of the Maximum Studentized Range Statistic with Application to Multiple Significance Testing of Simple Effects. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, 30, p.1-15. 1988.

COSBY, B. J. *et al.* A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils. **Water Resources Research**, v. 20, n. 6, p. 682-690, jun. 1984.

CRUZ, C. D.; FERREIRA, F. M.; PESSONI, L. A. **Biometria aplicada ao estudo da diversidade genética**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 620p. 2011.

DAVALO, M.J. **Curva de retenção de água no solo estimado pelo método da câmara de richards e psicrômetro**. 2013. 97 p. Dissertação (Mestrado em em Agronomia (Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus de Jaboticabal, 2013.

DE JONG van LIER, Q. **Física do solo - baseada em processos**. Piracicaba, 2020. 413 p.

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. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hardsetting. **Geoderma**, v.120, p.215–225, 2004

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part III. Theory, Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, v.120, p.227–239. 2004.

DEXTER, A.R.; CZYŻ E.A. Applications of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences. **Land Degradation and Development**, v.18, p.369–381, 2007.

DI PRIMA, S. *et al.* Soil Water Conservation: dynamics and impact. **Water**, v. 10, n. 7, p. 952-958, jul. 2018

Dos SANTOS, M. A. L. O fenômeno da histerese nas curvas de retenção da água no solo e no manejo da irrigação. **XXV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem**. UFS. São Cristovão-Se. p.723-728, 2015

DREWRY, J. J.; PATON, R. J. Soil physical quality under cattle grazing of a winter-fed brassica crop. **Soil Research**, [S.L.], v. 43, n. 4, p. 525, 2005.

EVRENDILEK, F.; CELIK, I.; KILIC, S.. Changes in soil organic carbon and other physical soil properties along adjacent Mediterranean forest, grassland, and cropland ecosystems in Turkey. **Journal Of Arid Environments**, [S.L.], v. 59, n. 4, p. 743-752, dez. 2004.

FELISBERTO, T.S.; MARINHO, L.B.; DEON, M.D.; ANDRADE, E.A.; SOUZA FILHO, J.R. Água Disponível no Solo com Ponto de Murcha Permanente Obtido por Diferentes Métodos. **Anais do II Inovagri International Meeting - 2014**, 2014.

FERRO, N. *et al.* Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. **Soil And Tillage Research**, v. 140, p. 55-65, jul. 2014.

GARCÍA, G.M.; PACHEPSKY, Y.A.; VEREECKEN, H. Effect of soil hydraulic properties on the relationship between the spatial mean and variability of soil moisture. **Journal of Hydrology**, v. 516, p. 154-160, 2014.

GERMER, S. *et al.* Influence of land-use change on near-surface hydrological processes: Undisturbed forest to pasture. **Journal of Hydrology**, v. 380, n. 3-4, p.473-480, 2010.

GRETLM: **Gnu Regression, Econometrics and Time-series Library**. 2020. Disponível em: <http://gretl.sourceforge.net/>. Acesso em: 15 set. 2020.

HAIR JUNIOR, J.F. *et al.* **Multivariate Data Analysis**. 7. ed. Upper Saddle River, Nova Jersey: Prentice Hall, 2009. 785 p.

HAMMER, Ø.; HARPER; D.A.T., RYAN, P.D. **PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis**. *Palaeontologia Electronica* v. 4, n.1, 2001. 9p.

HINKLE, D.E.; WIERSMA, W.; JURIS, S.G. **Applied Statistics for the Behavioral Sciences**. 5. ed. Boston. 2003. 792p.

HONGYU, K. *et al.* Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S - Engineering and Science**, Cuiabá, v. 1, n. 5, p. 83-90, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFICA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: IBGE, 1986.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

JAIN, A.K.; MURTY, M.N.; FLYNN, P.J. Data Clustering: A Review. **ACM Computing Surveys**, v. 31, n. 3, p. 264-323, 1999.

JURY, W.A.; GARDNER, W.R.; GARDNER, W.H. **Soil physics**. New York: Van Nostrand Reinhold. 1990. 328p.

KARUP, D.; MOLDRUP, P.; TULLER, M.; ARTHUR, E.; de JONGE, L.W. Prediction of the soil water retention curve for structured soil from saturation to oven-dryness. **European Journal of Soil Science**, v. 68, p. 57-65, 2017

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

KURNIANTO, S. *et al.* The influence of land-cover changes on the variability of saturated hydraulic conductivity in tropical peatlands. **Mitigation And Adaptation Strategies For Global Change**, v. 24, n. 4, p.535-555, 2018.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada**, 4.ed - São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2009.

Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF 09/01/1997, P. 470. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm. Acesso em: 10/05/2021.

LEPSCH, I.F. **Formação e Conservação de Solos**. 2. ed. – São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216p.

LI, H. *et al.* Changes in soil physical and hydraulic properties following the conversion of forest to cropland in the black soil region of Northeast China. **Catena**, p. 1-10, nov. 2020

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da Água no Solo**. 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2018. v. 1. 352p.

LIMA, W. de P. **HIDROLOGIA FLORESTAL APLICADA AO MANEJO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS**. 2. ed. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008. 245 p.

LIMA, H. V. de; SILVA, Á. P. da. Mesa de tensão com areia: procedimentos para montagem e validação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2209-2214, jun. 2008.

LIU, M. *et al.* Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China. **Environmental Pollution**, v. 242, p.855-862, 2018.

MAMEDOV, A.; EKBERLI, I.; GÜLSER, C.; GÜMÜŞ, I.; ÇETIN, U.; LEVY, G.J.G. Relationship between soil water retention model parameters and structure stability. **Eurasian Journal Of Soil Science**, [S.L.], v. 5, n. 4, p. 314-321, out. 2016.

MARTINKOSKI, L. *et al.*, Qualidade Física do Solo Sob Manejo Silvopastoril e Floresta Secundária. **Floresta e Ambiente**. [Online]. v. 24. 2017.

MINOSSO, J.; ANTONELI, V.; FREITAS, A.R. de. Variabilidade sazonal da infiltração de água no solo em diferentes tipos de uso na região sudeste do paraná. **Geographia Meridionalis**: Revista Eletrônica do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, v.3, n. 1, p.86-103, 2017.

MOHIEDDINNE, H.; BRASSEUR, B.; SPICHER, F.; GALLET-MORON, E.; BURIDANT, J.; KOBALISSI, A.; HOREN, H. Physical recovery of forest soil after compaction by heavy machines, revealed by penetration resistance over multiple decades. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 449, out. 2019.

MORETTIN, P.A.; BUSSAB, W. de O. **ESTATÍSTICA BÁSICA**. 9. ed. rev. e atual. Saraiva, São Paulo, 2017. 568 p.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, **Water Resource Research**, Washington, v. 12, p.513-522, 1976.

NASCIMENTO, P. dos S. **Análise do uso da curva de retenção de água no solo determinada por diferentes métodos e planilha para manejo da irrigação**. 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2009.

PEDROSA, I. *et al.* Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar? **Universitas Psychologica**, v.14, p. 245-254, 2015.

PIANA, C.F. de B.; MACHADO, A. de A.; SELAU, L.P.R. **Estatística Básica**. Pelotas, Departamento de Matemática e Estatística/Instituto de Física e Matemática/Universidade Federal de Pelotas, p. 119, 2009. (Apostila Didática).

PREVEDELLO, C.L. Novo método para estimativa da umidade do solo na condição de capacidade de campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.4 n.3 p.23–28, 1999.

PRICE, K., 2011. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: a review. **Progress in Physical Geography**. 35 (4), p.465–492. 2011.

PULIDO-MONCADA, M.; GABRIELS, D.; CORNELIS, W.M. Data-driven analysis of soil quality indicators using limited data. **Geoderma**, [S.L.], v. 235-236, p. 271-278, dez. 2014.

PULIDO-MONCADA, M.; BALL, B. C.; GABRIELS, D.; LOBO, D.; CORNELIS, W. M. Evaluation of Soil Physical Quality Index S for Some Tropical and Temperate Medium-Textured Soils. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 79, n. 1, p. 9-19, dez. 2014.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. 2020.

RAZALI, N.M.; WAH, Y.B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. **Journal Of Statistical And Analytics**, v. 2, n. 1, p. 21-33, 2011.

REBOUÇAS, C.A.M. **Condutividade hidráulica do solo a partir da curva de retenção de laboratório e de campo**. 2016. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Solos e Nutrição de Plantas, Universidade de São Paulo - Esalq, Piracicaba, 2016.

REICHARDT, K. Parte II: Os processos. A água em equilíbrio. In: REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4ª edição revista e ampliada. Campinas: Fundação Cargil. p. 98-165. 1985.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 3ª edição. Barueri: Manole, 2016. 547p.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Soil, Plant and Atmosphere: Concepts, Processes and Applications**. Switzerland: Springer Nature, 2020.

RESTREPO, L.F.; LÓPEZ, J.G. De Pearson a Spearman. **Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias**, v. 20, n. 2, p. 183-192, jun. 2007.

REYNOLDS, W.D. *et al.* Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, [s. l.], v. 110, p. 131-146, 2002.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; FOX, C.A.; YANG, X.M.. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, [S.L.], v. 152, n. 3-4, p. 252-263, set. 2009.

ROCHA, G.M. *et al.* Atributos físicos do solo de florestas urbanas como indicadores de degradação. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 3, p. 767-778, set. 2020.

SALES, L.E. de O. *et al.* Qualidade física de neossolo quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, vol.34, n.3, p.667-674, 2010.

SANTOS, H.G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SAMPIETRO, J.A. *et al.* Compactação causada pelo tráfego de Feller buncher e skidder em um neossolo regolítico sob distintas umidades. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 1, n. 25, p. 239-248, jan. 2015.

SEKUCIA, F.; DLAPA, P.; KOLLÁR, J.; CERDÁ, A.; HRABOVSKÝ, A.; SVOBODOVÁ, L.. Land-use impact on porosity and water retention of soils rich in rock fragments. **Catena**, v. 195, dez. 2020.

SILVA, A.M. da. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros**. 2005. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SINGH, B., SIHAG, P. & SINGH, K. Modelling of impact of water quality on infiltration rate of soil by random forest regression. **Model. Earth Syst. Environ.** 3, p. 999–1004, 2017.

SOARES, M.F. **Variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos e do carbono orgânico do solo de uma bacia hidrográfica de cabeceira em Canguçu - RS.** 2018. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

SOARES, M.F.; CENTENO, L.N.; TIMM, L.C; MELLO, C.R.; KAISER, D.R; BESKOW, S. Identifying Covariates to Assess the Spatial Variability of Saturated Soil Hydraulic Conductivity Using Robust Cokriging at the Watershed Scale. **Journal Of Soil Science And Plant Nutrition**, v.20, n.3, p.1491-1502, 2020.

SOKAL, R.R.; MICHENER, C.O. A statistical method for evaluating systematic relationships. **The University of Kansas Science Bulletin**, Lawrence, v.38, n.22, p.1409-1438, 1958.

SOUZA, E.D.; CARNEIRO, M.A.C.; PAULINO, H.B. Atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 40, n. 11, p. 1135-1139, nov. 2005.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C. do; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 3. ed. rev. ampl. Porto Alegre: UFRGS: EMATER/RS-ASCAR, 2018. 251 p.

STOESSEL, F. *et al.* Assessing the environmental impacts of soil compaction in Life Cycle Assessment. **Science Of The Total Environment**, v. 630, p. 913-921, jul. 2018

TEFERI, E.; BEWKET, W.; SIMANE, B. Effects of land use and land cover on selected soil quality indicators in the headwater area of the Blue Nile basin of Ethiopia. **Environmental Monitoring And Assessment**, [S.L.], v. 188, n. 2, p. 1-12, 7 jan. 2016.

TEIXEIRA, P.C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**, 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF, Embrapa, 2017. 573 p.

TIMM, L.C.; PIRES, L.F.; CENTENO, L.N.; BITENCOURT, D.G.B.; PARFITT, J.M. B.; CAMPOS, A.D.S. Assessment of land levelling effects on lowland soil quality indicators and water retention evaluated by multivariate and geostatistical analyses. **Land Degradation & Development**, [S.L.], v. 31, n. 8, p. 959-974, 7 jan. 2020.

TOLK, J.A. Soils, Permanent Wilting Points. **Encyclopedia of water science**; New York, p. 927-929. 2003

URACH, F.L. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação**. 2007.79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) -Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

USGS, Water Science School. Department Of The Interior. **The Water Cycle**. (2016). Disponível em: <https://water.usgs.gov/edu/watercycleinfiltration.html>. Acesso em: 09 abr. 2019.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 44, n. 5, p. 892-898, set. 1980.

VEBER, C.L.P. **Desempenho de modelos de hidrograma unitário em duas bacias hidrográficas com comportamento hidrológico contrastante**. 2016. 115f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

VIEIRA, S.R.; CASTRO, O.M. Determinação em laboratório de curvas de retenção de água com tensiômetros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.11, n.2, p.87-90, 1987.

VOGEL, H.J. *et al.* The dominant role of structure for solute transport in soil: experimental evidence and modelling of structure and transport in a field

experiment. **Hydrology And Earth System Sciences**, v. 10, n. 4, p.495-506, 7 jul. 2006.

VOGEL, H. Scale Issues in Soil Hydrology. **Vadose Zone Journal**, v. 18, n. 1, 2019.

VZZOTTO, V.R. *et al.* Efeito do pisoteio bovino em algumas propriedades físicas do solo de várzea. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 6, p. 965-969, 2000.

WANG, G. *et al.* Relationship between soil erodibility and modeled infiltration rate in different soils. **Journal Of Hydrology**, v. 528, p.408-418, 2015.

WIECHETECK, L.H.; GIAROLA, N.F.B.; LIMA, R.P.de; TORMENA, C.A.; TORRES, L.C.; PAULA, A.L. de. Comparing the classical permanent wilting point concept of soil (-15,000 hPa) to biological wilting of wheat and barley plants under contrasting soil textures. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 230, p. 59-65, mar. 2020.

WINTER, J. C. F. de; GOSLING, S. D.; POTTER, J. Comparing the Pearson and Spearman correlation coefficients across distributions and sample sizes: a tutorial using simulations and empirical data.. **Psychological Methods**, v. 21, n. 3, p. 273-290, set. 2016. American Psychological Association (APA).

WOOD, H. B. Hydrologic Differences between Selected Forested and Agricultural Soils in Hawaii. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, n. 1, p.132-142, 1977.

XING, X.; LI, Y.; MA, X. Water retention curve correction using changes in bulk density during data collection. **Engineering Geology**, [S.L.], v. 233, p. 231-237, jan. 2018

YAZICI, B.; YOLACAN, S. A comparison of various tests of normality. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, v. 77, n. 2, p. 175-183, fev. 2007.

YU, M.; ZHANG, L.; XU, X.; FEGER, K.H.; WANG, Y.; LIU, W.; SCHWÄRZEL, K. Impact of land-use changes on soil hydraulic properties of Calcaric Regosols on the

Loess Plateau, NW China. **Journal Of Plant Nutrition And Soil Science**, [S.L.], v. 178, n. 3, p. 486-498, 27 abr. 2015.

ZWIRTES, A.L. *et al.* Utilização do infiltrômetro de cornell e dos anéis concêntricos para determinação da infiltração de água em um Latossolo Vermelho. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 61, p.3489-3500, 2013.

Apêndice A

Script para calcular os índices Aa, WRa, Ar, WRr e AWR disponibilizado por Armindo e Wendroth (2016)

```
## Script for SWRC fitting parameters and indices calculation to run in software R

require(rootSolve)

## Starting fitting parameters of the van Genuchten (1980) equation for SWRC using non linear
regression – Least Squares Methods

data <- read.table("C:\\filename.csv", head=T, dec=".", sep=";")

data
summary(data)
with(data, plot(log(h)~theta,type="b", col=2))

#Fitting thetas, thetar, alpha and n parameters with some initial values

fitdata = nls(theta ~ thetar+(thetas-thetar)/((1 +(alpha*h)^n)^(1-1/n)), data = data, start =
list(thetas=0.4, thetar=0, alpha=0.05, n=1.8 ))
summary(fitdata)

# Calculation of the parameters m, thetapwp, thetas, thetar, n and alpha

m = with(as.list(coef(fitdata)), 1-(1/n))
thetapwp<- with(as.list(coef(fitdata)), thetar+(thetas-thetar)/((1+(alpha*15000)^n)^(1-1/n)))
thetas<- with(as.list(coef(fitdata)), thetas)
thetar<- with(as.list(coef(fitdata)), thetar)
n<- with(as.list(coef(fitdata)), n)
alpha<- with(as.list(coef(fitdata)), alpha)

## Calculation of the soil water content at field capacity

p=0.01
fun <- function(thetafc) {((thetafc-thetar)/(thetas-thetar))^0.5*(1-(1-((thetafc-thetar)/(thetas-
thetar))^(1/m))^m)^2 - p}
thetafc <- uniroot(fun, c(thetar, thetas))$root

## Matric tension calculation according to the field capacity value

hfc <- (1/alpha)*(((thetas-thetar)/(thetafc-thetar))^(1/m))-1)^(1/n)

## Writing the van Genuchten (1980) equation in h(theta) notation

pot <- with(as.list(coef(fitdata)), function(theta) (1/alpha)*(((thetas-thetar)/(theta-thetar))^(1/m))-
1)^(1/n))

## Absolute energy indices calculation

Aa=integrate(pot, thetafc, thetas)$value
WRa=integrate(pot, thetapwp, thetafc)$value

## Relative energy indices calculation

Ar=100*Aa/(Aa+WRa)
```

```

WRr=100*WRa/(Aa+WRa)
AWr=100*Aa/WRa
#Calling the results
thetapwp
thetafc
hfc
Aa
WRa
Ar
WRr
AWr

```

```
## Ploting the geometric representation of the energy-based indices
```

```

theta <- seq(thetar, thetas, l = 100)
plot(theta, ((1/alpha)*(((thetas-thetar)/(theta-thetar))^(1/m))-1)^(1/n)), ty = "l",
xlab=expression(theta(m^3*m^-3)), ylab="h (hPa)", xlim=c(thetar,thetas), ylim=c(0,500), lty=1, lwd=1)
abline(v = thetar, lty = 3)
abline(h = 0, lty = 3)
theta <- seq(thetapwp, thetafc, l = 100)
colore <- (1/alpha)*(((thetas-thetar)/(theta-thetar))^(1/m))-1)^(1/n)
polygon(rbind( cbind((theta),colore),cbind(rev(theta),0)), col = "gray", border="black", lty="dotted")
theta <- seq(thetafc, thetas, l = 100)
colore <- (1/alpha)*(((thetas-thetar)/(theta-thetar))^(1/m))-1)^(1/n)
polygon(rbind( cbind((theta),colore),cbind(rev(theta),0)), col = "black", border="black", lty="dotted")

```