

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel

**Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da
Água**



Tese de Doutorado

**Hierarquia Integrada da Qualidade Físico-Hidráulica do Solo em uma
Bacia Hidrográfica**

Angelo Garcia Costa

Pelotas, 2024

Angelo Garcia Costa

**Hierarquia Integrada da Qualidade Físico-Hidráulica do Solo em uma
Bacia Hidrográfica**

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Manejo e Conservação do
Solo e da Água da Faculdade de
Agronomia Eliseu Maciel da Universidade
Federal de Pelotas, como requisito parcial
à obtenção do título de Doutor em
Manejo e
Conservação do Solo e da Água.

Orientador: Prof. Dr. Luis Carlos Timm

Coorientador: Prof. Robson André Armindo

Coorientadora: Prof^a. Danni Maisa Silva

Pelotas, 2024

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

C837h Costa, Angelo Garcia

Hierarquia integrada da qualidade físico-hidráulica do solo em uma bacia hidrográfica [recurso eletrônico] / Angelo Garcia Costa ; Luis Carlos Timm, orientador ; Robson André Armindo, Danni Maisa Silva, coorientadores. — Pelotas, 2024.
158 f.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Retenção de água do solo. 2. Qualidade física do solo. 3. Condutividade hidráulica. 4. Manejo do solo. 5. Energia físico-hidráulica. I. Timm, Luis Carlos, orient. II. Armindo, Robson André, coorient. III. Silva, Danni Maisa, coorient. IV. Título.

CDD 631.43

Elaborada por Maria Beatriz Vaghetti Vieira CRB: 10/1032

Angelo Garcia Costa

Hierarquia Integrada da Qualidade Físico-Hidráulica do Solo em uma Bacia
Hidrográfica

Tese aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em
Manejo e Conservação do Solo e da Água, Programa de Pós-Graduação em
Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu
Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 19 de Agosto de 2024

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luis Carlos Timm

(Orientador)

Doutor em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP

Prof. Dr. Dalvan José Reinert

Doutor em Crops and Soil Science pela Michigan State University

Prof. Dr. Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki

Doutor em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria

Dr. Mauricio Fornalski Soares

Doutor em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Pelotas

Agradecimentos

Agradeço e dedico este trabalho à minha mãe Ivone Adriana Garcia Costa, ao meu pai Claudinei Bergoli Costa, à minha esposa Luana Duarte Quevedo e aos demais familiares, especialmente aos meus avós maternos Zuleica Frantz Garcia e Ivo Alberto Prestes Garcia (*in memoriam*) por serem a força motriz que me movimenta todos os dias em busca de evolução física e espiritual.

À Universidade Federal de Pelotas, e especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, por terem me proporcionado esta formação acadêmica.

Ao meu orientador Luis Carlos Timm pela sua parceria, apoio, confiança e disponibilidade.

Ao meu coorientador Robson André Armindo pela sua intensa, crítica e precisa colaboração em todos os momentos.

A minha coorientadora Danni Maisa Silva pela sua disponibilidade.

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

Aos meus colegas de laboratório, especialmente aos amigos Rômulo Félix Nunes, Miguel David Fuentes Guevara e Mauricio Fornalski Soares por terem sido essenciais para a realização deste trabalho.

Aos amigos Flávio Baptista Costa (*Mestre Puma*) e Valdi Castro (*Senpai*) pela amizade e ensinamentos nestes anos residindo em Pelotas.

Aos demais amigos e colegas por todo o auxílio, companheirismo e aprendizado ao longo desta jornada.

*"Open up your eyes,
Life is poetry in motion"*

Jani Lane

*"Everybody's got opinions
But nobody's got the answers"*

Tom Keifer

*"So come with me
Don't ask me where 'cause I don't know
I'll try to please you
I ain't got no money, but it goes to show"*

Duff McKagan

*"Now I know you and you know me, we have secrets we can share
We can build a new tomorrow, from the trash of yesterday
It won't be the last time, and I'm glad I found you"*

Bruce Dickinson

Resumo

COSTA, Angelo Garcia. **Hierarquia Integrada da Qualidade Físico-Hidráulica do Solo em uma Bacia Hidrográfica**. 2024. 157f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água). Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

Para avaliar a qualidade física do solo e suas implicações para o uso e gestão da água foi estabelecida uma malha experimental em uma bacia hidrográfica de cabeceira Sanga Ellert (BHSE) localizada em Canguçu-RS, Brasil. Foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas em 169 pontos amostrais, na camada de 0-0,20 m de profundidade, onde foram determinadas as frações texturais (argila, silte e areia) e as propriedades físico-hidráulicas densidade do solo, porosidade total, microporosidade, macroporosidade, condutividade hidráulica do solo saturado, teor de carbono orgânico e curva de retenção de água do solo (CRAS). O solo da área de estudo é predominantemente classificado como Neossolo Litólico Distrófico. Índices de energia hidráulica relacionados à aeração e retenção de água do solo foram calculados integrando áreas sob a CRAS. A partir da combinação dos índices absolutos de aeração e de retenção com a porosidade drenável, a água disponível para as plantas, os teores de areia e argila e a densidade do solo foi desenvolvido um índice único de saúde físico-hidráulica do solo (BSPHHI). Maiores valores de BSPHHI foram encontrados em solos cultivados com floresta nativa e silvicultura, enquanto que em solos cultivados com culturas anuais foram encontrados menores valores. Também foi realizada uma análise hierárquica de índices de qualidade física do solo, que variou de métricas básicas como densidade do solo e porosidade total a índices mais complexos de energia hidráulica e fluxo matricial. Essa abordagem hierárquica facilitou uma análise abrangente dos processos de aeração do solo, retenção de água e fluxos, fornecendo subsídios valiosos para o manejo racional do solo e da água na bacia. O BSPHHI e a análise hierárquica da qualidade física do solo podem auxiliar os produtores na tomada de decisão sobre futuras práticas de conservação do solo e da água na bacia hidrográfica.

Palavras Chaves: curva de retenção; qualidade física do solo; condutividade hidráulica; manejo do solo; água disponível; energia físico-hidráulica.

Abstract

COSTA, Angelo Garcia. **Integrated Hierarchy of Soil Physico-Hydraulic Quality in a Watershed**. 2024. 157p. Thesis (Doctoral Degree). Graduate Program in Management and Conservation of Soil and Water (PPG-MACSA). The Federal University of Pelotas, Pelotas, 2024.

To assess soil physical quality and its implications for water use and management, an experimental grid was established in the Ellert creek watershed (ECW) located in Canguçu-RS, Brazil. Disturbed and undisturbed soil samples were collected at 169 sampling points, at a depth of 0-0.20 m, where the textural fractions (clay, silt, and sand) and the physical-hydraulic properties of soil density, total porosity, microporosity, macroporosity, saturated hydraulic conductivity, organic carbon content, and soil water retention curve (SWRC) were determined. The soil in the study area is predominantly classified as Orthents. Hydraulic energy indices related to soil aeration and water retention were calculated by integrating areas under the SWRC. By combining the absolute indices of aeration and retention with drainable porosity, plant-available water, sand and clay contents, and soil density, a single soil physical-hydraulic health index (BSPHHI) was developed. Higher BSPHHI values were found in soils cultivated with native forest and silviculture, while lower values were found in soils cultivated with annual crops. A hierarchical analysis of soil physical quality indices was also performed, ranging from basic metrics such as soil density and total porosity to more complex indices of hydraulic energy and matric flow. This hierarchical approach facilitated a comprehensive analysis of soil aeration, water retention, and flow processes, providing valuable insights for the rational management of soil and water in the watershed. The BSPHHI and the hierarchical analysis of soil physical quality can assist producers in making decisions about future soil and water conservation practices in the watershed.

Key words: Soil water retention curve; soil physical quality; hydraulic conductivity; soil management; water capacity; physico-hydraulic energy.

Lista de Figuras

Figura 1	Representação de uma CRAS experimental.....	23
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.....	24
Figura 3	Representação geométrica das integrais definidas das CRAS para os índices de energia hidráulica propostos Armindo e Wendroth (2016, 2019), onde a cor preta representa o índice A_{a-pF} e a cor cinza representa o índice WR_{a-pF}	29
Artigo 1 - Exploring the soil structure analysis of a subtropical watershed by introducing a blanket physico-hydraulic health index		
Figura 1	Location (a), topography, hydrography, sampling points (b) and main land use types (c) in the Ellert Creek Watershed.....	70
Figura 2	Boxplots with Tukey Test for soil physical properties according to samples collected in ECW with different land uses. In which BD is bulk density (g cm^{-3}), TP is total porosity (%), Mic is microporosity (%), Mac is Macroporosity (%), OC is organic carbon (g cm^{-3}), and $\text{Log}_{10}K_{sat}$ is saturated hydraulic conductivity (mm/h) in Log_{10} basis. Boxes followed by the same lowercase letters do not differ according to the Tukey test at the 5% significance level.....	81
Figura 3	Boxplots with Tukey Test for parameters of eq.(1) and their derived physical-hydraulic properties for soils under different land uses, in which θ_{s-pF} is saturated volumetric water content ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_{fc-pF} is volumetric water content at field capacity ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), DP is drainable porosity ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), $PAWC$ is plant available water content ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Boxes followed by the same lowercase letters do not differ according to the Tukey test at the 5% significance level.....	84
Figura 4	Boxplots with Tukey Test for the hydraulic-energy indices by type of land use, in which A_{a-pF} is absolute aeration energy ($\log(\text{cm}) \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), A_{r-pF} is relative aeration energy (%), WR_{a-pF} is absolute water retention energy ($\log(\text{cm}) \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), WR_{r-pF} is relative water retention energy (%).	

pF is relative water retention energy (%), and AW_{r-pF} is relative air-water energy (%). Boxes followed by the same lowercase letters do not differ according to the Tukey test at the 5% significance level..... 86

Figura 5	Eigenvectors of the soil physical properties, hydraulic-energy indices, and clustering of the land uses. In which, Dim1: Dimension 1, Dim2: Dimension 2 and contrib: Contribution.....	87
----------	--	----

Artigo 2 - Hierarchical analysis of soil physical quality by means of water retention and flux

Figura 1	Location (a), topography, hydrography, sampling points (b) and main soil use types (c) in the Ellert Creek Watershed.....	109
----------	---	-----

Figura 2	Proposed Hierarchical Flowchart to SPQ examination.....	116
----------	---	-----

Lista de Tabelas

Artigo 1 - Exploring the soil structure analysis of a subtropical watershed by introducing a blanket physico-hydraulic health index

Tabela 1	Threshold limit ranges of the blanket soil physico-hydraulic health index (BSPHI) for the ECW soils.....	76
Tabela 2	Critical bulk density for different soil textures according to various authors.....	77
Tabela 3	Soil physical properties according to samples collected in ECW with different land uses.....	80
Tabela 4	SWRC' parameters and their derived physical-hydraulic properties for soils under different land uses.....	83
Tabela 5	Hydraulic-energy indices obtained from soil samples collected in regions occupied by different land uses.....	85
Tabela 6	Number of sample units and relative percentage for each BSPHHI result classification.....	89
Tabela 7	The sensitivity of BSPHI in ECW.....	89

Artigo 2 - Hierarchical analysis of soil physical quality by means of water retention and flux

Tabela 1	Soil physical properties according to samples collected in ECW with different land uses.....	119
Tabela 2	Hydraulic-energy indices obtained from soil samples collected in regions occupied by different land uses.....	121
Tabela 3	Matric Flux indices obtained from soil samples collected in regions occupied by different land uses.....	123
Tabela 4	Spearman Correlation and p-values between the physical properties, hydraulic-energy indices and the matric flux indices of soils under annual crops in ECW.....	125
Tabela 5	Spearman Correlation and p-values between the physical properties, hydraulic-energy indices and the matric flux indices of soils under pasture in ECW.....	126
Tabela 6	Spearman Correlation and p-values between the physical properties, hydraulic-energy indices and the matric flux indices of soils under native forest in ECW.....	127

Tabela 7	Spearman Correlation and p-values between the physical properties, hydraulic-energy indices and the matric flux indices of soils under silviculture in ECW.....	128
----------	---	-----

Lista de Abreviaturas e Siglas

A_{a-pF}	Índice absoluto de aeração do solo (hPa) na escala pF
ACP	Análise dos Componentes Principais
A_{r-pF}	Índice relativo do potencial de aeração do solo (%) na escala pF
Ass	Coeficiente de assimetria
AW_{r-pF}	Índice que compara a energia de aeração do solo com a energia de retenção de água do solo (%) na escala pF
Curt	Coeficiente de curtose
CRAS	Curva de Retenção de Água no Solo
CV	Coeficiente de variação
Ds	Densidade do solo (g cm^{-3})
GPS	Global Position System
h_{cc}	Tensão da água no solo na capacidade de campo (cm)
$K(h)$	Condutividade hidráulica do solo em relação a um determinado potencial
K_{sat}	Condutividade hidráulica do solo saturado
m	Parâmetro de forma ($1-1/n$)
M	Potencial do fluxo matricial
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
VGM	Equação de Van Genuchten-Mualem
WR_{a-pF}	Índice absoluto de retenção de água (hPa) na escala pF
WR_{r-pF}	Índice relativo de retenção de água (%) na escala pF
$\bar{X}$	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

Resumo	7
Abstract	8
1. Introdução	16
2. Revisão da literatura	20
2.1 Qualidade física do solo	20
2.2 Curvas de retenção de água no solo	22
2.3 Capacidade de campo	25
2.4 Ponto de murcha permanente	26
2.5 Água disponível para as plantas	26
2.6 Modelo de Van-Genuchten e Mualem	26
2.7 Funções hidráulico-energéticas	27
2.8 Condutividade hidráulica do solo saturado	30
2.9 Condutividade hidráulica do solo não saturado	31
2.10 O potencial de fluxo matricial	31
2.11 Ferramentas estatísticas aplicadas	32
2.11.1 Estatística descritiva e análise exploratória	32
2.11.2 Análise de componentes principais	33
2.11.3 Correlação de Spearman	34
3. Projeto de Pesquisa	35
4. Relatório do trabalho de campo	62
5. Artigo 1 - Exploring the soil structure analysis of a subtropical watershed by introducing a blanket physico-hydraulic health index	65
6. Artigo 2 - Hierarchical analysis of soil physical quality by means of water retention and flux	105
7. Considerações Finais	144
8. Referências	145

1. Introdução

O solo é um recurso natural não renovável essencial em todos os ecossistemas terrestres, estando diretamente relacionado com desenvolvimento humano, sendo responsável por diversas dinâmicas socioeconômicas e ambientais, 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, manejos adotados pelos produtores, etc.) são alguns dos principais desafios das ciências agrárias, ambientais e hidrológicas, pois vários atributos do solo apresentam comportamentos variados no ambiente, em função de fatores como material de origem, topografia, clima, cobertura vegetal, bem como dos usos e manejos aplicados ao solo.

Dentre os diversos atributos físico-hidráulicos oriundos desta relação, destacam-se os relacionados a retenção e ao movimento da água no solo, os quais representam respectivamente, a quantidade de água que um determinado solo pode armazenar em sua matriz e a capacidade de movimentação de água pela matriz do solo (Libardi, 2018; Reichardt; 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, 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; 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 (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.

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 saturado e não saturado e CRAS (Haruna *et al.*, 2020; Ramos *et al.*, 2020). Assim, é essencial avaliar a relação entre os tipos de uso do solo e os atributos físico-hidráulicos do solo (Li *et al.*, 2021), 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 de Pelotas e também possui um valor histórico e cultural incalculável para a região sul do Rio Grande do Sul, sendo 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. Entre as várias sub-bacias da BHAP pode-se destacar a sanga Ellert que é uma bacia de cabeceira da BHAP.

A Bacia Hidrográfica da Sanga Ellert (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 tabaco e a fragilidade natural dos Neossolos (principal classe de solos encontrados na BHSE) é necessário investigar alternativas e ferramentas que possam contribuir na sua preservação, pois as ações antrópicas desenvolvidas na área da bacia são potencialmente refletidas no comportamento dos diferentes processos hidrológicos a jusante da sua seção de controle, podendo 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 diversos índices de qualidade física do solo poderá dar subsídios e auxiliar pesquisadores e agricultores a otimizarem suas atividades visando minimizar o impacto das ações antrópicas e nortear futuras práticas de conservação, preservação e recuperação do solo.

1.1. Hipóteses

1. Os índices de energia hidráulica e de fluxo matricial baseados nas integrais da curva de retenção e de condutividade hidráulica apresentam sensibilidade a diferentes usos e manejos do solo e podem expressar a qualidade físico-hidráulica do solo em escala de bacia hidrográfica.
2. Os usos florestais apresentam qualidade física superior aos usos agrícolas na bacia de estudo.
3. É possível definir uma escala hierárquica para analisar sistematicamente a qualidade física do solo, por meio de variáveis envolvidas nos processos de aeração, retenção e fluxos de água no solo.
4. O índice *BSPHI* e a análise hierárquica de qualidade física do solo, juntos, oferecem uma compreensão dos fenômenos de aeração, retenção e de fluxo de água na matriz do solo da bacia hidrográfica.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Investigar o efeito do uso e manejo do solo na estrutura dos Neossolos predominantes na Bacia Hidrográfica Sanga Ellert por meio de índices de qualidade física do solo.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Avaliar a qualidade física do solo sob diferentes usos em escala de bacia hidrográfica, utilizando atributos físico-hidráulicos baseados nas curvas de retenção e de condutividade hidráulica do solo.
2. Formular um índice abrangente de qualidade físico-hidráulica do solo para capturar pequenas mudanças estruturais, independentemente dos usos e manejos.
3. Estruturar um fluxograma hierárquico dos índices de qualidade física do solo, organizado em diferentes níveis e aplicações visando analisar os processos de aeração, retenção e fluxos de água no solo.

2. Revisão da literatura

2.1 Qualidade física do solo

É possível avaliar a qualidade de um solo considerando o comportamento espaço-temporal de seus atributos físicos, biológicos e químicos, os quais são influenciados por fatores intrínsecos, como o tipo de solo, e extrínsecos, como as práticas de manejo adotadas pelo agricultor. Os principais atributos empregados para inferir sobre a qualidade do solo são:

- a densidade do solo, que é um indicador indireto da aeração, estruturação e capacidade de armazenamento e transporte de água (Reynolds *et al.*, 2002, 2009; Timm *et al.*, 2020; Rodríguez *et al.* 2022);
- a quantidade e a conectividade de macroporos, que ao permitir maior movimentação de água e ar, indica a capacidade de drenagem do solo e facilidade do crescimento das raízes (Reynolds *et al.*, 2002; Drewry; Paton, 2005; Pulido-Moncada *et al.*, 2014a; Timm *et al.*, 2020);
- a resistência do solo à penetração (Shah *et al.*, 2017; Mohieddinne *et al.*, 2019), pois o incremento da compactação resulta na redução da porosidade e, conseqüentemente, diminui as capacidades de aeração, infiltração e redistribuição de água, dificultando o desenvolvimento de raízes.
- a capacidade de aeração indica a habilidade do solo em armazenar ar nos seus espaços porosos (Reynolds *et al.*, 2009; Armindo; Wendroth 2016; 2019);
- a água disponível indica a capacidade do solo em armazenar e fornecer água às 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 água e solutos (Pulido-Moncada *et al.*, 2014a; Yu *et al.*, 2015; Soares *et al.*, 2023);
- o carbono orgânico do solo, que é um indicador da qualidade química e biológica do solo, desempenhando um papel indireto na qualidade física do solo (Reynolds *et al.*, 2009; Luo; Xu, 2022); e
- o índice S, que é utilizado para indicar a porosidade do solo, sua distribuição e geometria, sendo obtido a partir da inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo (Dexter, 2004a, 2004b, 2004c; Dexter; Czyż, 2007).

De acordo com Armindo e Wendroth (2016), não existe um único parâmetro ou índice revelador que permita uma avaliação precisa da estrutura

do solo. No entanto, em sistemas de produção intensiva de biomassa, os índices de qualidade física do solo são ferramentas úteis para auxiliar nas decisões de manejo, uma vez que indicam a sustentabilidade das dinâmicas da matéria orgânica do solo, drenagem, infiltração, transferência de calor e processos de armazenamento.

Armindo e Wendroth (2016, 2019) propuseram novos índices como uma alternativa para avaliar as energias de aeração e retenção associadas à estrutura física do solo. Esses índices incluem o Índice Absoluto de Aeração do Solo (A_a), o Índice Absoluto de Retenção de Água (WR_a), o Índice Relativo de Aeração do Solo (A_r), o Índice Relativo de Retenção de Água no Solo (WR_r) e o Índice do Potencial Relativo Ar-Água do Solo (AW_r). Esses índices podem ser representados tanto em escala numérica (Armindo e Wendroth, 2016) quanto em escala logarítmica $\log_{10}(h)$, conhecida como escala pF (Armindo e Wendroth, 2019). Segundo esses pesquisadores, a qualidade física do solo não deve ser inferida apenas com base em um único ponto da função hidráulica, mas sim considerando vários pontos ou a totalidade da função, o que é apoiado por Pulido-Moncada *et al.* (2014b).

Armindo e Wendroth (2016, 2019) destacam que esses índices podem ser uma ferramenta valiosa para identificar diferenças na QFS, atuando como "fatores de desempate" quando outros indicadores de QFS produzem resultados semelhantes. Bacher *et al.* (2019) afirmam que o índice AW_r é um indicador dinâmico e sensível, capaz de detectar mudanças temporais na QFS, podendo ser utilizado em diferentes escalas temporais e espaciais, servindo como uma ferramenta útil para a gestão de terras.

Esses índices são baseados na integração da 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 direcionada para a retenção de água no solo. Os mesmos autores enfatizam que o solo deve apresentar simultaneamente capacidade de aeração, retenção de água e propriedades de transporte que garantam o fluxo de água para atender às demandas hídricas das plantas. Com base nisso, assumem-se quatro premissas:

i) Um solo "virgem" que sustenta uma mata nativa pode apresentar um padrão desejado de qualidade física;

ii) Para que um projeto de drenagem seja eficiente, o solo deve possuir altos índices de aeração;

iii) Um solo destinado ao cultivo de culturas anuais deve fornecer quantidades adequadas de água e ar para suprir suas necessidades hídricas e de aeração;

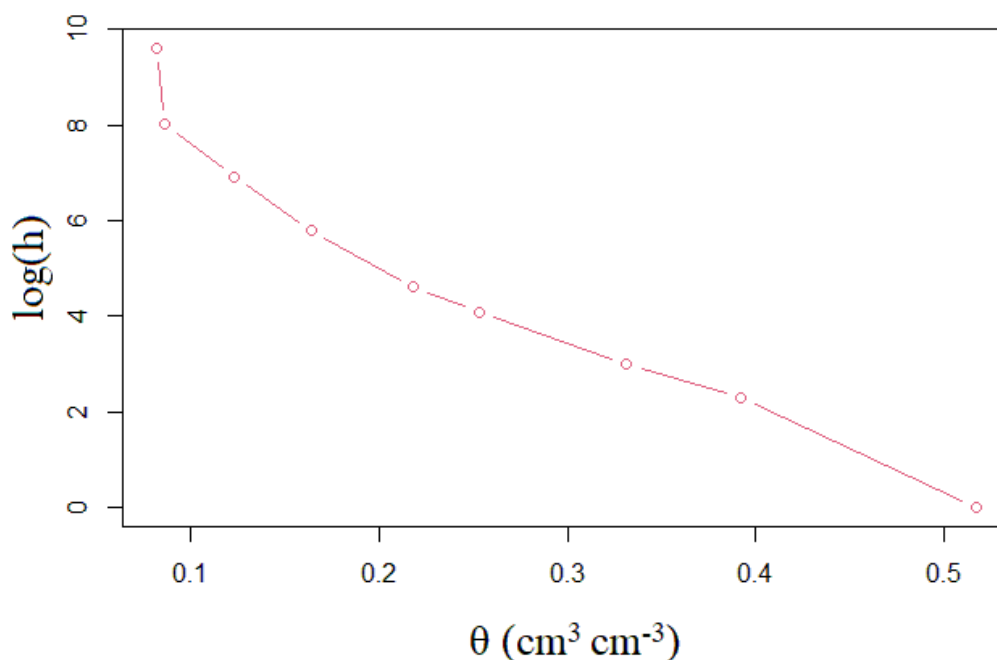
iv) O efeito da matéria orgânica e da resistência do solo à penetração na qualidade física do solo está diretamente relacionado à curva de retenção de água no solo (CRAS).

Mesmo levando em consideração essas quatro premissas fundamentais, estabelecer um padrão de qualidade física do solo continua sendo uma tarefa complexa, uma vez que é praticamente impossível abranger todas as variáveis envolvidas nos diferentes usos do solo.

2.2 Curvas de retenção de água no solo

A curva de retenção de água no solo (CRAS) desempenha um papel crucial na indicação da qualidade física do solo, pois expressa a relação entre o conteúdo de água no solo e o potencial matricial (ψ_m) (Figura 1), permitindo calcular a quantidade de água que um solo pode reter dentro de determinados limites de ψ_m e assim representando a energia com a qual a água é retida dentro da matriz do solo, sendo diretamente influenciada pelas suas características físicas e químicas e estando diretamente relacionada com o desenvolvimento das plantas (Novák; Hlaváčiková, 2019; De Jong Van Lier, 2020).

Figura 1 - Representação de uma CRAS experimental.



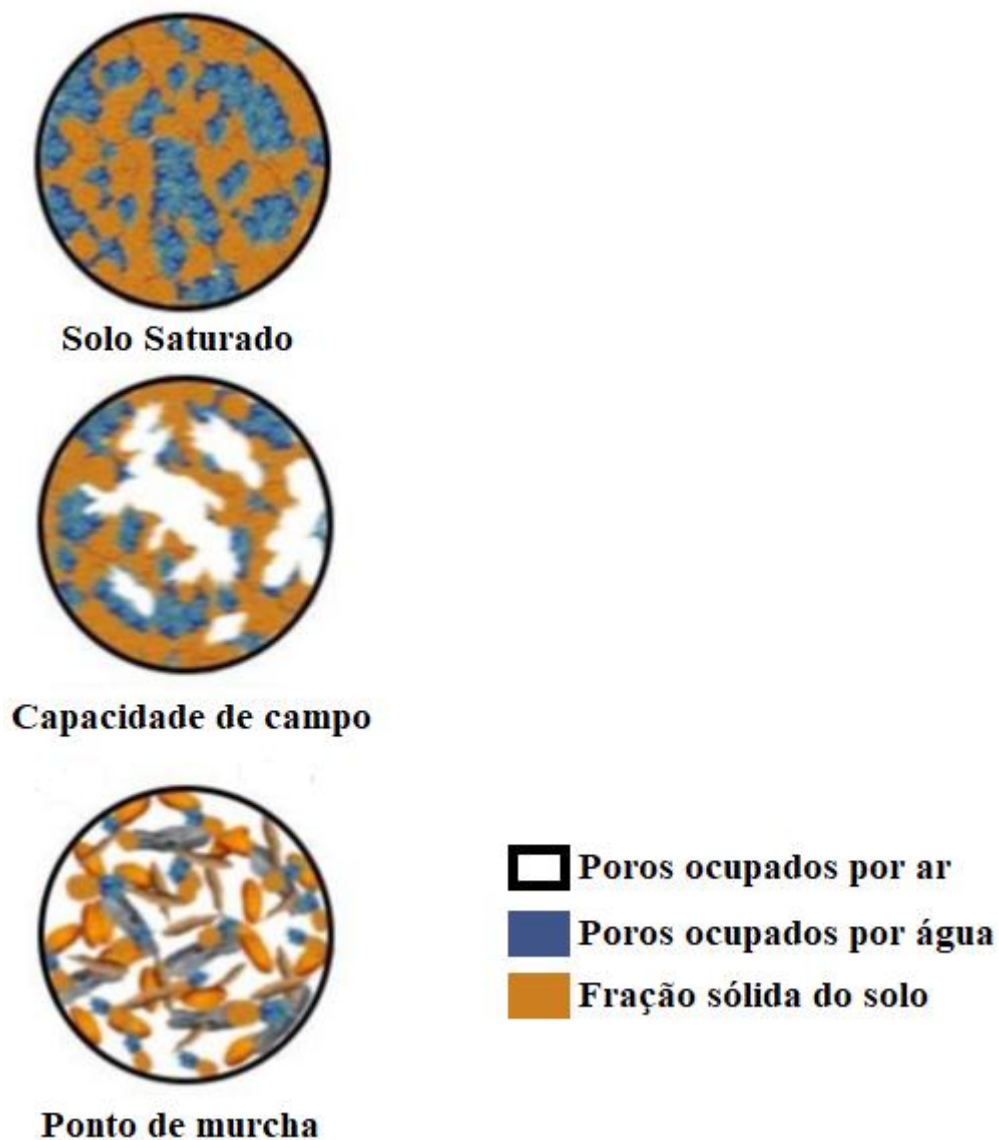
A relação entre o potencial matricial (ψ_m) e a umidade volumétrica (θ) é descrita matematicamente pelo modelo proposto por van Genuchten (1980), o qual é melhor dissertado no tópico 4.6. Para determinar essa relação experimentalmente, são obtidos pares de valores $\psi_m - \theta$ na faixa mais úmida do solo, alguns desses valores de ψ_m têm sido adotados para uma melhor compreensão da interação solo-água, pois expressam o estado energético em que a água fica retida na matriz do solo.

- 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 o retido nos potenciais menores que -60hPa é considerado como o retido nos microporos (Reichardt; 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, pode ser representado em gráfico $\log |\psi_m|$. Como o $\log_{10} 0 =$

$-\infty$, este ponto não é considerado na representação gráfica da CRAS (Armindo; Wendroth, 2019). Na Figura 2, é demonstrada a relevância dos fenômenos capilares na determinação do ψ_m . Nessas faixas a CRAS é principalmente influenciada pela dimensão e disposição dos poros, ou seja, pela estrutura do solo. (Reichardt; 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).



2.3 Capacidade de campo

Antigamente, foi definido como “o teor de água volumétrico remanescente em um perfil de solo dois ou três dias após ter sido completamente saturado com água e após a drenagem livre além da zona radicular ter se tornado negligenciável” (Veihmeyer; Hendrickson, 1949), ou seja, é o conteúdo de água retido na matriz do solo após a drenagem do excesso de água e a redução da taxa de movimento descendente, conforme Prevedello (1999) o valor da CC é influenciado pelo fluxo de drenagem interna do solo, que decresce rapidamente com o tempo e praticamente nunca cessa, tornando desafiador determinar um momento preciso para sua avaliação.

O valor da CC não é uma constante, mas sim uma medida prática da água retida no solo, e pode variar dependendo de fatores como tipo de solo, textura, teor de matéria orgânica e estrutura geral do solo (Rai *et al.*, 2017). Valores de tensão comumente adotados para representar a CC são de 100 hPa para solos de textura grossa e 330 hPa para solos de textura fina.

Lepsch (2010) define a CC de várias maneiras, como a quantidade máxima de água que pode permanecer nos poros do solo quando o movimento descendente da água diminui significativamente. Também pode ser descrita como a condição de umidade do solo após a drenagem completa da água livre pela ação da gravidade. Além disso, a CC representa o limite superior da água disponível para as plantas no solo.

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.

2.4 Ponto de murcha permanente

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; Silva *et al.*, 2020; Rab *et al.*, 2023). Quando o solo atinge essa tensão, as plantas entram em murcha permanente, o que significa que não conseguem mais se recuperar mesmo que seja fornecida água, pois suas células não conseguem retornar ao estado de turgor inicial (Reichardt; Timm, 2020). O valor de tensão comumente empregado na literatura é de 15000 hPa (Tolk, 2003; 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).

2.5 Água disponível para as plantas

A disponibilidade de água do solo para as plantas não se limita à quantidade total armazenada, pois a demanda hídrica das plantas está diretamente relacionada à transpiração, a qual varia significativamente de acordo com as condições climáticas e a densidade e eficiência das raízes, como superfície de absorção. Essa eficiência está diretamente ligada à condutividade hidráulica tanto das raízes quanto do solo (Kramer; Boyer, 1995).

Segundo Brady e Weil (1999), as raízes absorvem a água disponível, independentemente do tamanho do poro no solo. O fator determinante é o raio hidráulico do filme de água presente no poro. Ou seja, mesmo que o poro seja grande, se o volume de água dentro dele for pequeno, a sucção necessária para retirar essa água será alta. À medida que o solo se torna mais seco, torna-se progressivamente mais desafiador para as plantas extraírem água em uma taxa suficiente para atender às 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).

2.6 Modelo de Van-Genuchten e 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):

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

em que, $\theta(h)$: 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 1.

Utilizando a Equação 1 em conjunto com a teoria apresentada por Mualem (1976), Van Genuchten (1980) descreve que é conveniente fazer a restrição paramétrica demonstrada na Equação 2.

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

Ao combinar as Equações 1 e 2 obtém-se a Equação 3, conhecida como Equação de Van Genuchten-Mualem (VGM) (De Jong Van Lier, 2020).

$$\psi_m(\theta) = \alpha^{-1} \left\{ \left[\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right]^{\frac{n}{n-1}} - 1 \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

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

De Jong Van Lier (2020) diz que o parâmetro n é mais difícil de avaliar porque aparece duas vezes como expoente na equação. No entanto, é evidente que ele influencia a forma da CRAS: valores maiores de n tornam a curva mais acentuada, indicando uma resposta mais sensível às variações na pressão da água. O mesmo autor afirma que na equação VGM o parâmetro α multiplica o ψ_m , o que acaba aumentando-o e a curva se reduz em relação ao eixo-Y, ou seja, os pontos ficam mais próximos do eixo-Y e ainda segundo este autor, um mal-entendido comum é que este parâmetro corresponde ao inverso da pressão de entrada do ar definida na equação de Brooks & Corey. Em termos simples, α está relacionado à estrutura do solo e ao tamanho dos poros. Solos com poros menores geralmente terão valores maiores de α , enquanto solos com poros maiores ou mais agregados terão valores menores.

2.7 Funções hidráulico-energéticas

A equação VGM também pode ser representada na escala $pF = \log_{10}(h)$ (Armando e Wendroth, 2019; Bacher et al., 2022; Fuentes-Guevara et al., 2022)

$$\theta(pF) = \theta_{r-pF} + \frac{\theta_{s-pF} - \theta_{r-pF}}{\left[1 + (\alpha_{pF} \cdot pF)^{n_{pF}}\right]^{1-1/n_{pF}}} \quad (4)$$

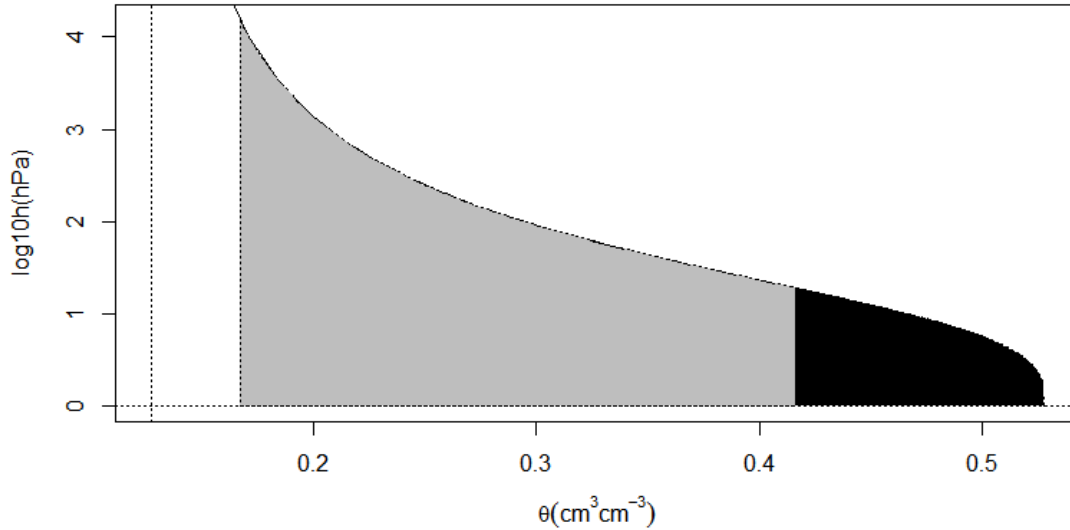
onde, $h(\theta)$ é o potencial mátrico absoluto em função do conteúdo volumétrico de água, θ_{s-pF} é o teor de água saturada, θ_{r-pF} é o teor de água residual, α_{pF} e n_{pF} são parâmetros de ajuste baseados em na escala pF .

O primeiro índice proposto por Armindo e Wendroth (2016, 2019) é o índice absoluto de aeração do solo na escala pF (A_{a-pF}) (Equação 5) representado geometricamente pela área de cor preta na Figura 3. Este índice quantifica a energia associada à gravidade para drenar a água no solo de θ_{s-pF} para θ_{cc-pF} . Se o valor de A_{a-pF} , for pequeno, o trabalho energético realizado pela gravidade para drenar a água é pequeno e, provavelmente, o solo atinge a θ_{cc-pF} rapidamente.

$$A_{a-pF} = \int_{\theta_{cc-pF}}^{\theta_{s-pF}} pF(\theta) d\theta \quad (5)$$

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

Figura 3 - Representação geométrica das integrais definidas das CRAS para os índices de energia hidráulica propostos por Armindo e Wendroth (2016, 2019), onde a cor preta representa o índice A_{a-pF} e a cor cinza representa o índice WR_{a-pF} .



O segundo índice proposto é o índice absoluto de retenção de água (WR_{a-pF}) (Equação 6) representado geometricamente pela área de cor cinza na Figura 3. Este índice quantifica a energia associada a retenção de água entre θ_{cc-pF} e θ_{pmp-pF} .

$$WR_{a-pF} = \int_{\theta_{pmp-pF}}^{\theta_{fc-pF}} pF(\theta) d\theta \quad (6)$$

onde, WR_{a-pF} é o índice absoluto de retenção de água no solo (hPa) e θ_{pmp-pF} é o conteúdo de água no solo referente ao ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)

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

$$A_{r-pF} = 100 \left(\frac{A_{a-pF}}{A_{a-pF} + WR_{a-pF}} \right) \quad (7)$$

onde, A_{r-pF} é o índice relativo de aeração do solo (%) na escala pF , A_{a-pF} é o índice absoluto de aeração do solo (hPa) e WR_{a-pF} é o índice absoluto de retenção de água no solo (hPa).

O quarto índice proposto é o índice relativo de retenção de água no solo (WR_{r-pF}), conforme demonstrado na Equação 8.

$$WR_{r-pF} = 100 \left(\frac{WR_{a-pF}}{A_{a-pF} + WR_{a-pF}} \right) \quad (8)$$

onde, WR_{r-pF} é o índice relativo de retenção de água do solo (%) na escala pF , A_{a-pF} é o índice absoluto de aeração do solo (hPa) e WR_{a-pF} é o índice absoluto de retenção de água no solo (hPa).

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 (AW_{r-pF}), 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.

$$AW_{r-pF} = 100 \left(\frac{A_{a-pF}}{WR_{a-pF}} \right) \quad (9)$$

onde, AW_{r-pF} é o índice do potencial relativo ar-água do solo (%) na escala pF , A_{a-pF} é o índice absoluto de aeração do solo (hPa) e WR_{a-pF} é o índice absoluto de retenção de água no solo (hPa).

2.8 Condutividade hidráulica do solo saturado

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{Sat}) é um parâmetro singular na ciência do solo, sendo definida como a taxa de infiltração no solo em condição de saturação, quando esta apresenta um estado estacionário, sendo dependente do tamanho e arranjo do espaço poroso do solo (Chapuis, 2012; Zhang; Schaap, 2019). A determinação de valores representativos de K_{Sat} e sua distribuição no espaço é necessária em muitas circunstâncias, pois esta influencia vários processos hidrológicos como a taxa de infiltração, a geração de escoamento superficial e a drenagem profunda, afetando todo o ambiente em uma bacia hidrográfica (Araya; Ghezzehei, 2019).

Darcy (1856) estabeleceu a primeira lei experimental para descrever o fluxo de água em meios porosos, esta lei estabelece uma relação linear entre o gradiente hidráulico e a K_{Sat} . Entre diversos estudos, destacam-se Mualem (1976) e Van Genuchten (1980) que desenvolveram equações teóricas amplamente utilizadas para descrever a relação entre a umidade do solo e a K_{Sat} , levando em consideração a influência dos efeitos capilares e da curvatura das interfaces entre a água e o solo.

2.9 Condutividade hidráulica do solo não-saturado

A condutividade hidráulica do solo não saturado (K) desempenha um papel fundamental no estudo do fluxo de água em solos, sendo uma função do teor de água ou da pressão capilar para um solo específico (Mualem; Dagan, 1978). Brooks e Corey (1964) apresentaram uma abordagem essencial para descrever a curva característica de retenção de água do solo, que é uma relação entre a pressão da água no solo e a umidade do solo, e seu trabalho estabeleceu a base para a compreensão dos mecanismos de fluxo em solos não saturados. Posteriormente, Van Genuchten (1980) propôs uma das equações mais amplamente utilizadas para descrever a relação entre a umidade do solo e a condutividade hidráulica, sendo essencial para o desenvolvimento de modelos matemáticos do fluxo de água em solos não saturados.

$$K(h) = K_{sat} \left(1 + (\alpha h)^n \right)^{-m\lambda} \left(1 - \frac{(\alpha h)^{n-1}}{\left(1 + (\alpha h)^n \right)^m} \right)^2 \quad (10)$$

onde, $K(h)$ é a condutividade hidráulica do solo como uma função do potencial matricial (h), K_{sat} é a condutividade hidráulica na condição de saturação, α , n e m são parâmetros de ajuste.

2.10 O potencial de fluxo matricial

O potencial de fluxo matricial (M) é uma propriedade hidráulica do solo que se mostra extremamente útil em estudos de movimentação da água no solo, especialmente quando essa movimentação não leva em consideração o potencial gravitacional ou quando ocorre em uma distância reduzida (De Jong Van Lier, 2020). Ele se relaciona diretamente com a condutividade hidráulica do solo, pois M é definido como a integral da condutividade hidráulica $K(h)$ por meio do potencial matricial h (Pinheiro *et al.*, 2019):

$$M = \int_{h_{ref}}^h K(h) dh \quad (11)$$

em que, h_{ref} representa o potencial de referência, escolhido arbitrariamente.

$$MF_{Aa} = \int_{h_{fc}}^0 K(h) dh \quad (12)$$

$$MF_{WRa} = \int_{15000}^{h_{fc}} K(h) dh \quad (13)$$

em que, MF_{Aa} e MF_{WRa} são os índices absolutos de energia hidráulica de fluxo matricial de aeração e retenção de água, respectivamente. 0, h_{fc} e 15000 são os limites de integração e, respectivamente, denotam o potencial matricial na saturação, capacidade de campo e ponto de murcha permanente.

Os intervalos de potencial de fluxo matricial relativos aos índices de energia hidráulica de aeração (MF_{Ar}), retenção de água (MF_{WRr}) e ar e água (MF_{AWr}), que também estão relacionados à estrutura do solo e, portanto, utilizados para apoiar a análise da QFS, foram quantificados por

$$MF_{Ar} = 100[MF_{Aa} / (MF_{Aa} + MF_{WRa})] \quad (14)$$

$$MF_{WRr} = 100[MF_{WRa} / (MF_{Aa} + MF_{WRa})] \quad (15)$$

$$MF_{AWr} = 100(MF_{Ar} / MF_{WRr}) \quad (16)$$

2.11 Ferramentas estatísticas aplicadas

2.11.1 Estatística descritiva e análise exploratória

A estatística descritiva desempenha um papel fundamental na organização, apresentação e resumo dos dados por meio de gráficos, tabelas e medidas descritivas (Morettin; Bussab, 2017), entre as medidas estatísticas mais comuns, destacam-se as medidas de tendência central ou posição (média, mediana e moda) que resumem o conjunto de dados observados em um único número representativo.

As medidas de dispersão (desvio padrão, variância e o coeficiente de variação) são empregadas para indicar o quão dispersos ou afastados os dados estão em relação ao valor médio. O desvio padrão fornece uma medida da variação dos dados em torno da média, enquanto a variância quantifica a dispersão total dos dados e o coeficiente de variação é uma medida relativa de

dispersão, expressando o desvio padrão em relação à média como uma porcentagem (Larson; Farber, 2009).

Além das medidas de tendência central e dispersão, também são consideradas medidas que descrevem o formato da distribuição dos dados, a assimetria indica a tendência da distribuição de dados em relação à sua média. A curtose, por sua vez, fornece informações sobre o “achatamento” da distribuição dos dados em relação à distribuição normal (Larson; Farber, 2009; Morettin; Bussab, 2017).

Uma ferramenta gráfica amplamente utilizada na Estatística Descritiva é o *boxplot* (gráfico de caixa), sendo uma representação visual que fornece informações sobre a distribuição dos dados consistindo em um retângulo (caixa) que abrange o intervalo interquartil, com uma linha vertical (mediana) no meio, incluindo medidas de tendência central, dispersão, presença de valores atípicos e simetria. As linhas que se estendem a partir da caixa, conhecidas como *whiskers* (bigodes), representam a variação dos dados dentro de uma determinada faixa, valores atípicos são indicados como pontos individuais além dos bigodes, sendo denominados como *outliers* (Piana *et al.*, 2009; Morettin; Bussab, 2017). Para todas as análises serão utilizados os softwares R (R Core Team, 2023) e Microsoft Excel.

2.11.2 Análise de componentes principais

Pearson (1901) apresentou a noção de correlação entre variáveis e propôs a decomposição dos dados em componentes ortogonais que explicam diferentes proporções da variância total.

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica estatística que 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 (Bro; Smilde, 2014).

O objetivo principal da análise de componentes principais é o de explicar a estrutura da variância e covariância de um vetor aleatório, composto de p-

variáveis aleatórias, por meio de combinações lineares das variáveis originais (Hongyu *et al.*, 2015).

2.11.3 Correlação de Spearman

A correlação de Spearman é uma medida não paramétrica utilizada para avaliar a relação monotônica entre duas variáveis, ou seja, se uma variável tende a aumentar ou diminuir de maneira consistente à medida que a outra varia. De acordo com Zang e Wang (2023), o coeficiente de correlação de postos de Spearman é adequado tanto para dados com distribuição normal quanto para dados não normais, sendo eficaz na caracterização de correlações lineares e não lineares. Além disso, é mais robusto e menos sensível a outliers do que a correlação de Pearson. Conforme Ratner (2009), correlações com valores entre 0 e 0,3 (ou 0 e -0,3) indicam uma relação linear positiva (ou negativa) fraca, enquanto valores entre 0,3 e 0,7 (ou -0,3 e -0,7) sugerem uma relação linear positiva (ou negativa) moderada. Valores entre 0,7 e 1,0 (ou -0,7 e -1,0) indicam uma relação linear positiva (ou negativa) forte, e valores de 1 ou -1 representam uma relação linear perfeita (positiva ou negativa).

3. Projeto de Pesquisa

1.Introdução

O solo é um recurso natural não renovável essencial em todos os ecossistemas terrestres, estando diretamente relacionado com desenvolvimento humano, sendo responsável por diversas dinâmicas socioeconômicas e ambientais, 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, manejos adotados pelos produtores, etc.) são alguns dos principais desafios das ciências agrárias, ambientais e hidrológicas, pois vários atributos do solo são heterogêneos e se comportam de maneira diferente no ambiente devido a fatores como material de origem, topografia, clima, cobertura vegetal e usos e manejos do solo.

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 (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 (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.

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 saturado e não saturado e CRAS. Assim, é essencial avaliar a relação entre os tipos de uso do solo e os atributos físico-hidráulicos do solo (LI *et al.*, 2021), 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 de Pelotas e também possui um valor histórico e cultural incalculável para a região sul do Rio Grande do Sul, sendo 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. Entre as várias sub-bacias da BHAP pode-se destacar a sanga Ellert que é uma bacia de cabeceira da BHAP.

A bacia hidrográfica Sanga Ellert (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 na BHSE) é necessário investigar alternativas e ferramentas que possam contribuir na sua preservação, pois as ações antrópicas desenvolvidas na área da bacia são potencialmente refletidas no comportamento dos diferentes processos hidrológicos a jusante da sua seção de controle, podendo provocar a aceleração dos processos erosivos e de degradação da camada superficial do solo onde as principais interações entre o sistema solo-água-plantas-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.

Outro fator importante neste trabalho é que na ciência do solo tem-se observado um número crescente de índices e indicadores da saúde do solo, sejam físicos, químicos ou biológicos. Porém algumas vezes não se faz necessário o uso de índices de complexa aquisição para se obter uma resposta acerca do potencial agrícola ou do grau de degradação do solo.

Neste trabalho será dada ênfase aos índices físicos de qualidade do solo, onde será criado um fluxograma para definir uma escala hierárquica dos índices do solo com ênfase no produtor rural, ou seja, quando um grupo de indicadores de obtenção menos onerosa não gera uma resposta satisfatória entre os diferentes usos ou tipos de solos, outros de maior sensibilidade é utilizado. O objetivo é basicamente definir esta escala e assim poupar tempo e dinheiro para os produtores rurais.

2. Revisão da literatura

2.1 Qualidade Física do Solo (QFS)

É possível avaliar a qualidade de um solo considerando o comportamento espaço-temporal de seus atributos físicos, biológicos e químicos, os quais são influenciados por fatores intrínsecos, como o tipo de solo, e extrínsecos, como

as práticas de manejo adotadas pelo agricultor. Os principais atributos empregados para inferir sobre a qualidade do solo são:

- a densidade do solo, que é um indicador indireto da aeração, estruturação e capacidade de armazenamento e transmissão de água (REYNOLDS *et al.*, 2002, 2009; TIMM *et al.*, 2020; Rodríguez *et al.* 2022);

- a quantidade de macroporos, que de forma indireta indica a capacidade de drenagem do solo e facilidade do crescimento das raízes (REYNOLDS *et al.*, 2002; DREWRY e PATON, 2005; PULIDO-MONCADA *et al.*, 2014a; TIMM *et al.*, 2020);

- a resistência do solo à penetração, que é um indicador da compactação do solo (SHAH *et al.*, 2017; MOHIEDDINNE *et al.*, 2019) e da resistência do solo à penetração de raízes, sendo que seu incremento resulta na redução da porosidade e, conseqüentemente, diminuindo as capacidades de aeração, infiltração e movimentação de água, e dificultando o desenvolvimento de raízes. Esse processo pode ocorrer devido ao tráfego de maquinário pesado, pisoteio de animais ou manejo inadequado do solo.

- a capacidade de aeração indica a habilidade do solo em armazenar ar nos seus espaços porosos (REYNOLDS *et al.*, 2009; ARMINDO 2013; ARMINDO e WENDROTH 2016; 2019);

- a capacidade de água disponível indica a capacidade do solo em armazenar e fornecer água às 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 água e solutos (PULIDO-MONCADA *et al.*, 2014a; YU *et al.*, 2015; SOARES *et al.*, 2023);

- o carbono orgânico do solo, que é um indicador da qualidade química e biológica do solo, desempenhando um papel indireto na saúde do solo (REYNOLDS *et al.*, 2009; LUO e XU, 2022); e

- o índice S, que é utilizado para indicar a porosidade do solo, sua distribuição e geometria, sendo obtido a partir 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).

De acordo com Armindo e Wendroth (2016), as análises qualitativas de variáveis físicas, químicas ou biológicas são desafiadoras e frequentemente

ambíguas, isso também se aplica aos índices de qualidade física do solo. Não existindo um único parâmetro ou índice revelador que permita uma avaliação precisa da estrutura do solo. No entanto, em sistemas de produção intensiva de biomassa, os índices de qualidade física do solo são ferramentas úteis para auxiliar nas decisões de manejo, uma vez que indicam a sustentabilidade das dinâmicas 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 uma alternativa para avaliar as energias de aeração e retenção associadas à estrutura física do solo. Esses índices incluem o Índice Absoluto de Aeração do Solo (A_a), o Índice Absoluto de Retenção de Água (WR_a), o Índice Relativo de Aeração do Solo (A_r), o Índice Relativo de Retenção de Água no Solo (WR_r) e o Índice do Potencial Relativo Ar-Água do Solo (AW_r). Esses índices podem ser representados tanto em uma escala numérica quanto na escala logarítmica $\log_{10}(h)$, conhecida como escala pF . Segundo esses pesquisadores, a qualidade física do solo não deve ser inferida apenas com base em um único ponto da função hidráulica, mas sim considerando vários pontos ou a totalidade da função, o que é apoiado por Pulido-Moncada *et al.* (2014b).

Armindo e Wendroth (2016, 2019) destacam que esses índices podem ser uma ferramenta valiosa para identificar diferenças na QFS, atuando como "fatores de desempate" quando outros indicadores de QFS produzem resultados finais semelhantes. Bacher *et al.* (2019) afirmam que o índice AW_r é um indicador dinâmico e sensível, capaz de detectar mudanças temporais na QFS, podendo ser utilizado em diferentes escalas temporais e espaciais, servindo como uma ferramenta útil para a gestão de terras.

Esses índices são baseados na integração da curva de retenção de 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 direcionada para a retenção de água no solo. Os mesmos autores enfatizam que o solo deve apresentar simultaneamente capacidade de aeração, retenção de água e propriedades de transporte que garantam o fluxo de água para atender às demandas hídricas das plantas. Com base nisso, assumem-se quatro premissas:

- i) Um solo "virgem" que sustenta uma mata nativa pode ter um padrão desejado de qualidade física;
- ii) Para que um projeto de drenagem seja eficiente, o solo deve possuir altos índices de aeração;
- iii) Um solo destinado ao cultivo de culturas anuais deve fornecer quantidades adequadas de água e ar para suprir suas necessidades hídricas e de aeração;
- iv) O efeito da matéria orgânica e da resistência do solo à penetração na qualidade física do solo está diretamente relacionado à curva de retenção de água no solo (CRAS).

Mesmo levando em consideração essas quatro premissas fundamentais, estabelecer um padrão de qualidade física do solo continua sendo uma tarefa complexa, uma vez que é praticamente impossível abranger todas as variáveis envolvidas nos diferentes usos do solo. Isso ocorre porque a qualidade física do solo desejada para o cultivo de uma cultura anual, como por exemplo o milho, é diferente daquela desejada para o plantio de uma cultura de longo prazo, como por exemplo eucalipto.

2.2 Curvas de Retenção de água no Solo (CRAS)

A curva de retenção de água no solo (CRAS) desempenha um papel crucial na indicação da qualidade física do solo, pois expressa a relação entre o conteúdo de água no solo e o potencial matricial (ψ_m) (Figura 1), permitindo calcular a quantidade de água que um solo pode reter dentro de determinados limites de ψ_m e assim representando a energia com a qual a água é retida dentro da matriz do solo, sendo diretamente influenciada pelas suas características físicas e químicas e estando diretamente relacionada com o desenvolvimento das plantas (NOVÁK e HLAVÁČIKOVÁ, 2019; DE JONG VAN LIER, 2020).

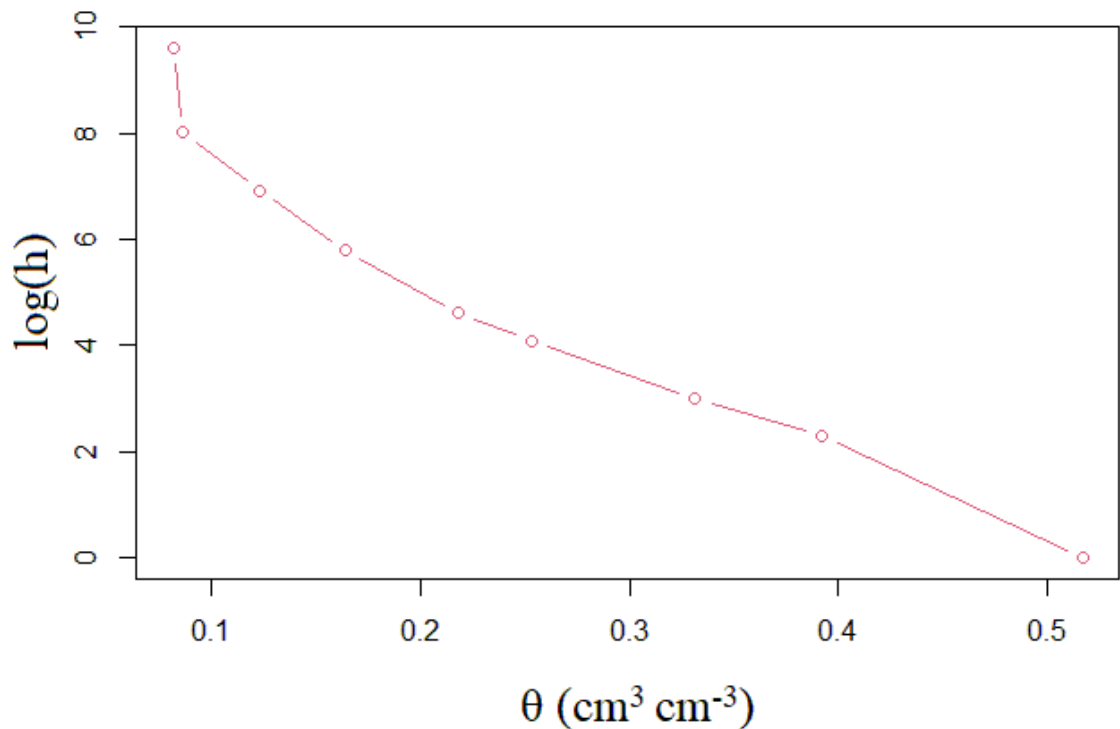


Figura 1 – Representação de uma CRAS experimental.

A relação entre o potencial matricial (ψ_m) e a umidade volumétrica (θ) é descrita matematicamente pelo modelo proposto por van Genuchten (1980), o qual é melhor dissertado no tópico 4.6. Para determinar essa relação experimentalmente, são obtidos pares de valores ψ_m - θ na faixa mais úmida do solo, alguns desses valores de ψ_m têm sido adotados para uma melhor compreensão da interação solo-água, pois expressam o estado energético em que a água fica retida na matriz do solo.

- 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 $\log_{10} 0 = -\infty$, este ponto não é considerado na representação gráfica da CRAS (ARMINDO e WENDROTH, 2019).

Na Figura 2, é evidenciada a relevância dos fenômenos capilares na determinação do ψ_m em conteúdos de água próximos à saturação do solo. Nessa faixa a CRAS é principalmente influenciada pela dimensão e disposição dos poros, ou seja, pela estrutura do solo. No entanto, em teores mais baixos de água, os fenômenos de adsorção ganham maior importância em relação aos capilares (REICHARDT e TIMM, 2020).

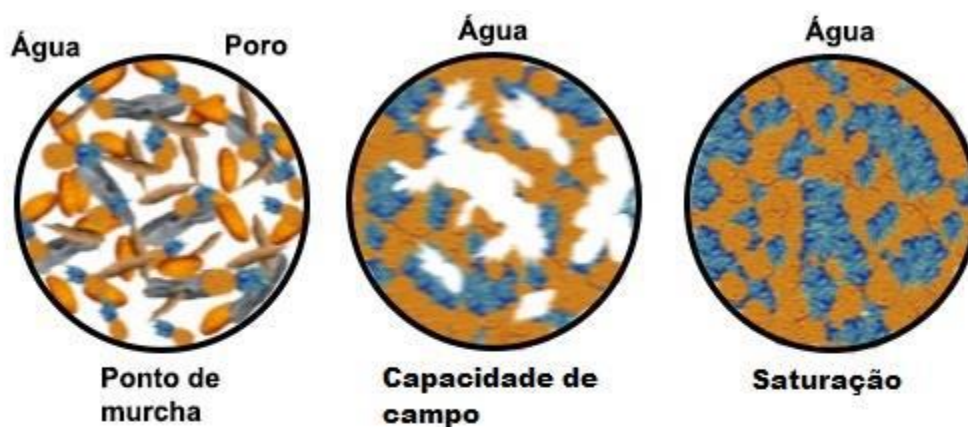


Figura 2 - Ilustração do espaço poroso de uma amostra de solo ocupado pela água e pelo ar no ponto de murcha permanente, na capacidade de campo e no ponto de saturação do solo. Adaptado de LEPSCH (2010).

2.3 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, conforme Prevedello (1999) o valor da CC é influenciado pelo fluxo de drenagem interna do solo, que decresce rapidamente com o tempo e praticamente nunca cessa, tornando desafiador determinar um momento preciso para sua avaliação.

O valor da CC não é uma constante, mas sim uma medida prática da água retida no solo, e pode variar dependendo de fatores como a composição e o tipo de solo. Valores de tensão comumente adotados para representar a CC são de 100 hPa para solos de textura grossa e 330 hPa para solos de textura fina.

Lepsch (2010) define a CC de várias maneiras, como a quantidade máxima de água que pode permanecer nos poros do solo quando o movimento descendente da água diminui significativamente. Também pode ser descrita como a condição de umidade do solo após a drenagem completa da água livre pela ação da gravidade. Além disso, a CC representa o limite superior da água disponível para as plantas no solo.

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.

2.4 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; SILVA *et al.*, 2020; RAB *et al.*, 2023). Quando o solo atinge essa tensão, as plantas entram em murcha permanente, o que significa que não conseguem mais se recuperar mesmo que seja fornecida água, pois suas células não conseguem retornar ao estado de turgor inicial (REICHARDT e TIMM, 2020). O valor de tensão comumente empregado na literatura é de 15000 hPa (TOLK, 2003; 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).

2.5 Capacidade de água disponível (CAD)

A disponibilidade de água do solo para as plantas não se limita à quantidade total armazenada, pois a demanda hídrica das plantas está diretamente relacionada à transpiração, a qual varia significativamente de acordo

com as condições climáticas e a densidade e eficiência das raízes, como superfície de absorção. Essa eficiência está diretamente ligada à condutividade hidráulica tanto das raízes quanto do solo (KRAMER e BOYER, 1995).

Segundo Brady e Weil (1999), inicialmente as raízes retiram água dos macroporos, onde o potencial matricial é relativamente alto, à medida que esses poros são esgotados, as raízes passam a absorver água de poros cada vez menores, nos quais o potencial matricial é mais baixo e as forças de adesão da água às superfícies sólidas são maiores. Conforme o solo vai se tornando mais seco, torna-se progressivamente mais desafiador para as plantas extrair água do solo em uma taxa que seja suficiente para atender às 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). Devido à falta de um conceito preciso, a quantidade de água disponível para as plantas no solo é influenciada por diversos fatores, entre eles, destacam-se a quantidade e o tipo de argila presentes, a presença de matéria orgânica e a concentração de sais. Esses elementos desempenham um papel importante na determinação da porcentagem de água que pode ser utilizada pelas plantas no solo.

2.6 Modelo de Van-Genuchten e 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):

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

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 1.

Utilizando a Equação 1 em conjunto com a teoria apresentada por Mualem (1976), Van Genuchten (1980) descreve que é conveniente fazer a restrição paramétrica demonstrada na Equação 2.

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

Ao combinar as Equações 1 e 2 obtém-se a Equação 3, conhecida como Equação de Van Genuchten-Mualem (VGM) (De Jong Van Lier, 2020).

$$\psi_m(\theta) = \alpha^{-1} \left\{ \left[\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right]^{\frac{n}{n-1}} - 1 \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

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

2.7 Funções Hidráulico-Energéticas

A equação VGM também pode ser representada na escala $pF = \log_{10}(h)$ (Armindo e Wendroth, 2019; Bacher et al., 2022; Fuentes-Guevara et al., 2022)

$$\theta(pF) = \theta_{r-pF} + \frac{\theta_{s-pF} - \theta_{r-pF}}{\left[1 + (\alpha_{pF} \cdot pF)^{n_{pF}} \right]^{1-1/n_{pF}}} \quad (4)$$

onde, $h(\theta)$ é o potencial mátrico absoluto em função do conteúdo volumétrico de água, θ_{s-pF} é o teor de água saturada, θ_{r-pF} é o teor de água residual, α_{pF} e n_{pF} são parâmetros de ajuste baseados em na escala pF .

O primeiro índice proposto por Armindo e Wendroth (2016, 2019) é o índice absoluto de aeração do solo na escala pF (A_{a-pF}) (Equação 5) representado geometricamente pela área de cor preta na Figura 3. Este índice quantifica a energia associada à gravidade para drenar a água no solo de θ_{s-pF} para θ_{cc-pF} . Se o valor de A_{a-pF} , for pequeno, o trabalho energético realizado pela gravidade para drenar a água é pequeno e, provavelmente, o solo atinge a θ_{cc-pF} rapidamente.

$$A_{a-pF} = \int_{\theta_{cc-pF}}^{\theta_{s-pF}} pF(\theta) d\theta \quad (5)$$

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

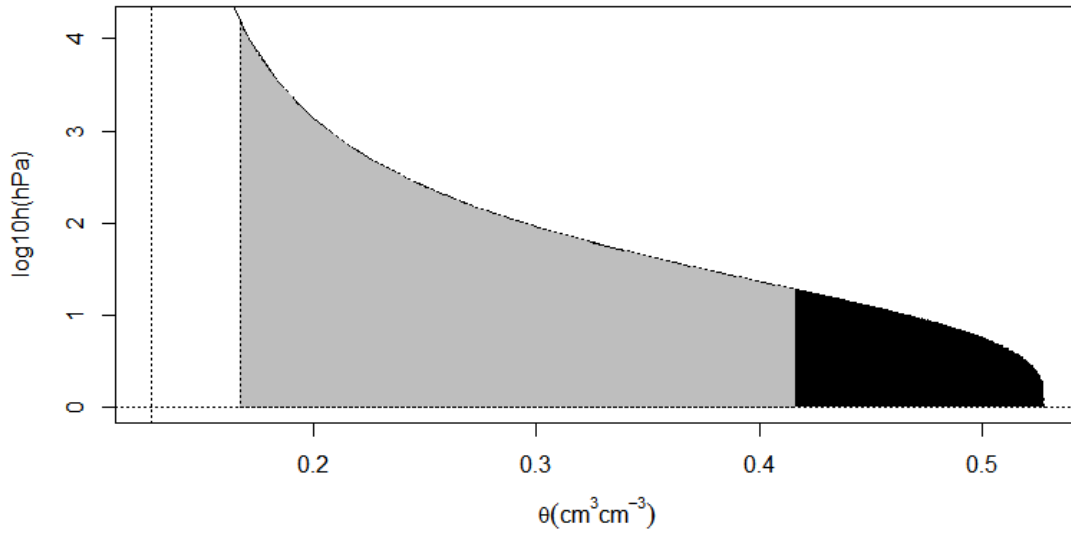


Figura 3 - Representação geométrica das integrais definidas das CRAS para os índices de energia hidráulica propostos por Armindo (2013) e Armindo e Wendroth (2016, 2019).

O segundo índice proposto é o índice absoluto de retenção de água (WR_{a-pF}) (Equação 6) representado geometricamente pela área de cor cinza na Figura 3. Este índice quantifica a energia associada a retenção de água entre θ_{cc-pF} e θ_{pmp-pF} .

$$WR_{a-pF} = \int_{\theta_{pmp-pF}}^{\theta_{cc-pF}} pF(\theta) d\theta \quad (6)$$

onde, WR_{a-pF} é o índice absoluto de retenção de água no solo (hPa) e θ_{pmp-pF} é o conteúdo de água no solo referente ao ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)

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

$$A_{r-pF} = 100 \left(\frac{A_{a-pF}}{A_{a-pF} + WR_{a-pF}} \right) \quad (7)$$

onde, A_{r-pF} é o índice relativo de aeração do solo (%) na escala pF .

O quarto índice proposto é o índice relativo de retenção de água no solo (WR_{r-pF}), conforme demonstrado na Equação 8.

$$WR_{r-pF} = 100 \left(\frac{WR_{a-pF}}{A_{a-pF} + WR_{a-pF}} \right) \quad (8)$$

onde, WR_{r-pF} 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 (AW_{r-pF}), 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.

$$AW_{r-pF} = 100 \left(\frac{A_{a-pF}}{WR_{a-pF}} \right) \quad (9)$$

onde, AW_{r-pF} é o índice do potencial relativo ar-água do solo (%)

2.8 Condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat})

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) é um parâmetro singular na ciência do solo, sendo definida como a taxa de infiltração no solo em condição de saturação, quando esta apresenta um estado estacionário, sendo dependente do tamanho e arranjo do espaço poroso do solo (CHAPUIS, 2012; ZHANG e SCHAAP, 2019). A determinação de valores representativos de K_{sat} e sua distribuição no espaço é necessária em muitas circunstâncias, pois esta influencia vários processos hidrológicos como a taxa de infiltração, a geração de escoamento superficial e a drenagem profunda, afetando todo o ambiente em uma bacia hidrográfica (ARAYA e GHEZZEHEI, 2019).

Darcy (1856) estabeleceu a primeira lei experimental para descrever o fluxo de água em meios porosos, esta lei estabelece uma relação linear entre o gradiente hidráulico e a K_{sat} . Entre diversos estudos, destacam-se Mualem (1976) e Van Genuchten (1980) que desenvolveram equações teóricas amplamente utilizadas para descrever a relação entre a umidade do solo e a K_{sat} , levando em consideração a influência dos efeitos capilares e da curvatura das interfaces entre a água e o solo.

2.9 Condutividade hidráulica do solo não-saturado (K)

A condutividade hidráulica do solo não saturado (K) desempenha um papel fundamental no estudo do fluxo de água em solos, sendo uma função do

teor de água ou da pressão capilar para um solo específico (MUALEM e DAGAN,1978). Brooks e Corey (1964) apresentaram uma abordagem essencial para descrever a curva característica de retenção de água do solo, que é uma relação entre a pressão da água no solo e a umidade do solo, e seu trabalho estabeleceu a base para a compreensão dos mecanismos de fluxo em solos não saturados. Posteriormente, Van Genuchten (1980) propôs uma das equações mais amplamente utilizadas para descrever a relação entre a umidade do solo e a condutividade hidráulica, sendo essencial para o desenvolvimento de modelos matemáticos do fluxo de água em solos não saturados.

Šimůnek *et al.* (2008) desenvolveram o modelo HYDRUS para simulação do fluxo de água e transporte de solutos em solos não saturados. Esse modelo tem sido amplamente utilizado e possui uma estrutura teórica sólida que leva em consideração a condutividade hidráulica do solo não saturado.

2.10 O potencial de fluxo matricial

O potencial de fluxo matricial (M) é uma propriedade hidráulica do solo que se mostra extremamente útil em estudos de movimentação da água no solo, especialmente quando essa movimentação não envolve um componente gravitacional (fluxo horizontal) ou quando ocorre em uma distância reduzida (DE JONG VAN LIER, 2020).

M é definido como a integral da condutividade hidráulica $K(h)$ através do potencial matricial h (Pinheiro *et al.*, 2019):

$$M = \int_{h_{ref}}^h K(h)dh \quad (10)$$

onde h_{ref} representa o potencial de referência, escolhido arbitrariamente.

2.11 Ferramentas estatísticas aplicadas

2.11.1 Estatística descritiva e análise exploratória

A estatística descritiva desempenha um papel fundamental na organização, apresentação e resumo dos dados por meio de gráficos, tabelas e medidas descritivas (MORETTIN e BUSSAB, 2017), entre as medidas estatísticas mais comuns, destacam-se as medidas de tendência central ou

posição (média, mediana e moda) que resumem o conjunto de dados observados em um único número representativo.

As medidas de dispersão (desvio padrão, variância e o coeficiente de variação) são empregadas para indicar o quão dispersos ou afastados os dados estão em relação ao valor médio. O desvio padrão fornece uma medida da variação dos dados em torno da média, enquanto a variância quantifica a dispersão total dos dados e o coeficiente de variação é uma medida relativa de dispersão, expressando o desvio padrão em relação à média como uma porcentagem (LARSON e FARBER, 2009).

Além das medidas de tendência central e dispersão, também são consideradas medidas que descrevem o formato da distribuição dos dados, a assimetria indica a tendência da distribuição de dados em relação à sua média. A curtose, por sua vez, fornece informações sobre o achatamento da distribuição dos dados em relação à distribuição normal (LARSON e FARBER, 2009; MORETTIN e BUSSAB, 2017).

Uma ferramenta gráfica amplamente utilizada na Estatística Descritiva é o *boxplot* (gráfico de caixa), sendo uma representação visual que fornece informações sobre a distribuição dos dados consistindo em um retângulo (caixa) que abrange o intervalo interquartil, com uma linha vertical (mediana) no meio, incluindo medidas de tendência central, dispersão, presença de valores atípicos e simetria. As linhas que se estendem a partir da caixa, conhecidas como *whiskers* (bigodes), representam a variação dos dados dentro de uma determinada faixa, valores atípicos são indicados como pontos individuais além dos bigodes, sendo denominados como *outliers* (PIANA *et al.*, 2009; MORETTIN e BUSSAB, 2017). Para todas as análises serão utilizados os softwares R (R Core Team, 2023) e Microsoft Excel.

2.11.2 Análise de componentes principais

Pearson (1901) apresentou a noção de correlação entre variáveis e propôs a decomposição dos dados em componentes ortogonais que explicam diferentes proporções da variância total.

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica estatística que 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

O objetivo principal da análise de componentes principais é o de explicar a estrutura da variância e covariância de um vetor aleatório, composto de p -variáveis aleatórias, por meio de combinações lineares das variáveis originais (HONGYU et al., 2015).

3. Hipóteses

5. Os índices de energia hidráulica baseados na integral da curva de retenção expressam a qualidade físico-hidráulica do solo em escala de bacia hidrográfica.
6. Os usos florestais apresentam qualidade física superior aos usos agrícolas na bacia de estudo.
7. Os índices de energia hidráulica baseados na integral da curva de retenção possuem alta sensibilidade a diferentes usos e manejos do solo.
8. É possível definir uma hierarquia, conforme o grau de onerosidade, para uma aplicação racional e financeiramente viável dos diferentes índices de qualidade física do solo.

4. Objetivos

4.1 Objetivo geral

Investigar o efeito do uso e manejo da terra na estrutura física dos Neossolos predominantes na Bacia Hidrográfica Sanga Ellert por meio de índices de saúde do solo.

4.2 Objetivos específicos

1. Examinar a influência dos atributos físico-hidráulicos do solo em diferentes usos da terra em escala de bacia hidrográfica.
2. Definir um fluxograma hierárquico dos índices de saúde do solo, organizados em diferentes níveis e aplicações.

5. Material e Métodos

Este trabalho será realizado a partir de um banco de dados de atributos físico-hidráulicos do solo obtidos pelo grupo de pesquisa entre os anos de 2018 e 2020 na bacia Sanga Ellert, localizada no município de Canguçu, RS.

Para o estabelecimento da malha amostral e a obtenção das coordenadas UTM de cada ponto, foi utilizado o software ArcGIS (ESRI, 2014). A malha amostral 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.

Em cada ponto amostral, foram coletadas amostras de solo deformadas na camada de 0 a 20 cm para determinar o teor de carbono orgânico pelo método de Walkley-Black (Nelson e Sommers, 1982) e as frações texturais de areia (usando o método de peneiramento), silte e argila pelo método da Pipeta (Gee e Bauder, 1986), também foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada nesta mesma camada, entre 0 e 5 cm, utilizando anéis volumétricos com altura de 5,0 cm e diâmetro interno de 4,8 cm, sendo determinados os seguintes atributos físico-hidráulicos do solo: densidade do solo, porosidade total do solo, macroporosidade e microporosidade. Foi utilizado o método de carga constante (KLUTE e DIRKSEN, 1986) para a medição em laboratório da K_{Sat} a partir das amostras coletadas. 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 CRAS em cada ponto amostral (conteúdo de água no solo retido nas tensões de 10; 20; 60; 100; 330; 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. 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 330, 1000, 3000 e 15000 hPa foram determinados por meio da câmara de pressão de Richards. A porosidade total foi considerada igual ao conteúdo de água na amostra de solo quando saturada (Teixeira *et al.*, 2017). Desta forma, será elaborada uma CRAS experimental para cada ponto amostral, sendo ajustada ao modelo matemático de van Genuchten (1980).

A partir de cada modelo ajustado de CRAS, serão 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 ($\alpha_D = \theta_s - \theta_{cc}$) e a água disponível para as plantas ($PAWC = \theta_{cc} - \theta_{pmp}$) (ARMINDO e WENDROTH 2016, 2019; REICHARDT e TIMM, 2020). Os valores do conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{cc}) serão obtidos a partir da metodologia de Prevedello (1999), a qual utiliza um método iterativo onde a θ_{cc} é definida como 1% da K_{sat} .

Para o cálculo das funções hidráulico-energéticas a equação VGM será representada na escala $pF = \log_{10}(h)$ (Equação 4) e serão calculados os índices absolutos de aeração (A_{a-pF}) e retenção de água (WR_{a-pF}) do solo na escala pF (Equações 5 e 6), os índices relativos de aeração (A_{r-pF}) e de retenção de água (WR_{r-pF}) do solo (Equações 7 e 8), além disso será calculado o índice do potencial relativo ar-água do solo (AW_{r-pF}) (Equação 9).

Para calcular as as curvas de condutividade hidráulica do solo não saturado será utilizada a equação 10 e a partir dela a equação 11 calculará os potenciais de fluxo matricial absolutos (equações 12 e 13) e relativos nas regiões de aeração (equação 14) e de retenção (equação 15), além do potencial de fluxo matricial que demonstra o equilíbrio entre essas regiões (equação 16).

No primeiro artigo desta tese será feito um índice global de qualidade física do solo, o qual irá combinar as forças de aeração e retenção e outros atributos básicos à partir de suas correlações, visando observar pequenas mudanças estruturais que são possíveis de observar ao combinar variáveis em uma equação.

No segundo artigo será feita uma análise hierárquica definindo uma ordem de análise dos atributos menos complexos e onerosos até os mais complexos, demonstrando o grau de análise que cada atributo pode demonstrar.

6. Metas

Ao final deste trabalho busca-se:

- Auxiliar na tomada de decisões dos produtores locais ao definir locais críticos para a conservação do solo a partir da caracterização dos atributos físico-hidráulicos e dos índices de qualidade física do solo.
- Criar uma metodologia pioneira para captar pequenas diferenças na estrutura do solo através da utilização de índices de qualidade física.
- Criar uma metodologia de fácil utilização para definir a ordem de análise de atributos físico-hidráulicos do solo.

7. Impactos esperados

7.1 Impactos Econômicos

Reduzir os custos de novos estudos científicos ao criar um índice global de qualidade física do solo e definir uma ordem hierárquica de análise de atributos físico-hidráulicos.

7.2 Impactos Sociais

Demonstrar o impacto das atividades antrópicas para os produtores da região, fazendo com que a conscientização de melhores práticas possa vir a agregar em métodos de produção agrícola.

7.3 Impactos Ambientais

Captar pequenas diferenças na estrutura do solo através da utilização de índices de qualidade física.

8. Orçamento detalhado

Este projeto será realizado com um banco de dados pertencente ao grupo de pesquisa, não sendo necessárias idas a campo, nem a aquisição de novos materiais, portanto o custo com viagens, diárias e materiais de consumos será zero.

9. Divulgação dos resultados

A divulgação dos resultados deste estudo será realizada através de publicações em anais de eventos científicos, artigos científicos publicados em periódicos, além de dias de campo e extensão rural, fomentando a comunidade científica e os produtores rurais.

10. Cronograma de atividades

Atividade	Ano 1		Ano 2		Ano 3	
Disciplinas						
Revisão de Literatura						
Análises estatísticas						
Redação de artigos e Tese						
Submissão de artigos						
Qualificação						

12. Equipe do projeto

O presente trabalho de pesquisa será efetuado pelo Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água (PPG MACSA) da Universidade Federal de Pelotas (UFPeI) em parceria com a Universidade Federal de Lavras (UFLA) e a Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), unidade de Três Passos, RS.

UFPeI: Prof. Luís Carlos Timm (Orientador)

UFLA: Prof. Robson André Armindo (Coorientador)

UERGS: Prof^a. Danni Maísa da Silva (Coorientadora)

13. Referências bibliográficas

ARAYA, S.N.; GHEZZEHEI, T.A. Using Machine Learning for Prediction of Saturated Hydraulic Conductivity and its Sensitivity to Soil Structural Perturbations. **Water Resources Research**, 2019. doi:10.1029/2018wr024357.

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.

BACHER, M. G.; SCHMIDT, O.; BONDI, G.; CREAMER, R.; FENTON, O. 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**, v. 83, n. 1, p. 5-17, jan. 2019.

BACHER, M.G.; ARMINDO, R.A.; SCHMIDT, O.; BONDI, G.; FENTON, O. Testing numeric and logarithmic scales for hydraulic-energy indices and functions to assess physical earthworm effects on soil structure. **Geoderma Regional**, v. 28, 2022.

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: Prentice Hall, 1999. 559 p.

BROOKS, R.H.; COREY, A.T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Paper**. Colorado State University, 1964.

CHAPUIS, R.P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 71, p. 401-434, 2012.

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.; DE PASCALE, V.; LIBERTI, M.; ROMANO, N. Saturated hydraulic conductivity of a sandy-loam soil determined using in situ falling head infiltration tests. **Geoderma**, v. 322, p. 29–36, 2018.

DREWRY, J.J.; PATON, R.J. Soil physical quality under cattle grazing of a winter-fed brassica crop. **Soil Use and Management**, v. 21, n. 2, p. 245-254, 2005.

ESRI. ArcGIS: Geographic Information System Software. Version 10.2.2. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2014.

FUENTES-GUEVARA, M.D., ARMINDO, R.A., TIMM, L.C., & FARIA, L.C. Examining the land leveling impacts on the physical quality of lowland soils in Southern Brazil. **Soil Tillage Res.**, v. 215, 105217, 2022.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. Part 1. 2nd ed. Madison: ASA, SSSA, 1986. p. 383–411.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V.L.M.; OLIVEIRA JUNIOR, G.J. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S Engineering and Science**, v. 5, n. 1, p. 83–90, 2015.

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

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

KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed. Madison: ASA, SSSA, 1986. p. 687–734.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

LEPSCH, I.F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 254 p.

LI, H.; YAO, Y.; ZHANG, X.; ZHU, H.; WEI, X. Changes in soil physical and hydraulic properties following the conversion of forest to cropland in the black soil region of Northeast China. **Catena**, [S.L.], v. 198, p. 104986, mar. 2021

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

LUO, L.; XU, L. Effects of biochar and biochar-based fertilizer on soil physical properties and wheat yield under saline–sodic conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 2, p. 1042–1052

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.

MOHIEDDINNE, H.; BRASSEUR, B.; SPICHER, F.; GALLET-MORON, E.; BURIDANT, J.; KOBAISSI, 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 Resources Research**, Washington, v. 12, p. 513-522, 1976.

MUALEM, Y.; DAGAN, G. Hydraulic Conductivity of Soils: Unified Approach to the Statistical Models¹. **Soil Science Society of America Journal**, v. 42, n. 3, p. 392, 1978.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. (Eds.). **Methods of Soil Analysis**. Part 2. 2. ed. Agronomy Monograph, v. 9. Madison, WI: ASA-SSSA, 1982. p. 534–580.

NOVÁK, V.; HLAVÁČIKOVÁ, H. Soil-water retention curve. In: **Applied Soil Hydrology: Theory and Applications of Transport in Porous Media**, v. 32. 2019.

PEARSON, K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. **Philosophical Magazine**, v. 2, n. 11, p. 559-572, 1901.

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.

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*. Vienna: **R Foundation for Statistical Computing**, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

RAB, M.A.; NASTA, P.; ARMINDO, R.A.; BEVERLY, C.R.; REYNOLDS, W.D.; ROMANO, N. Empirical equations for estimating field capacity in dryland cropping soils of southeastern Australia. *Soil and Tillage Research*, [S.L.], v. 234, p. 105816, out. 2023. doi:10.1016/j.still.2023.105816.

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

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; LU, X. 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.

RODRÍGUEZ, B.C.; DURÁN-ZUAZO, V.H.; RODRÍGUEZ, M.S.; GARCÍA-TEJERO, I.F.; RUIZ, B.G.; TAVIRA, S.C. Conservation agriculture as a sustainable system for soil health: a review. *Soil Systems*, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 87, 23 nov. 2022.

SHAH, A.N.; TANVEER, M.; SHAHZAD, B.; YANG, G.; FAHAD, S.; ALI, S.; BUKHARI, M.A.; TUNG, S.A.; HAFEEZ, A.I.; SOULIYANONH, B. Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, [S.L.], v. 24, n. 11, p. 10056-10067, 21 jan. 2017.

SILVA, A.J.P.; PINHEIRO, E.A.R.; VAN LIER, Q.J. Determination of soil hydraulic properties and its implications for mechanistic simulations and irrigation management. **Irrigation Science**, [S.L.], v. 38, n. 3, p. 223-234, 11 fev. 2020.

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.

SOARES, M.F.; TIMM, L.C.; SIQUEIRA, T.M.; SANTOS, R.C.V. dos; REICHARDT, K. Assessing the spatial variability of saturated soil hydraulic conductivity at the watershed scale using the sequential Gaussian co-simulation method. **Catena**, [S.L.], v. 221, fev. 2023.

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.

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.

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.

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.

ZHANG, Y.; SCHAAP, M. G. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: a review. ***Journal of Hydrology***, [S.L.], 2019.

4. Relatório do trabalho de campo

O estudo foi conduzido na Bacia Hidrográfica da Sanga Ellert (BHSE), uma sub-bacia hidrográfica da Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas, localizada inteiramente no município de Canguçu, região Sul do estado do Rio Grande do Sul. A BHSE 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) 63% da população total do município está localizada nas áreas rurais e sua economia é baseada na produção de tabaco, milho, leite, suínos e aves.

A BHSE possui 0,66 km² de área total, o clima regional é classificado como tipo Cfa, de acordo com a classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013), o que representa um ambiente subtropical, com influências do mar, verões subúmidos e condições úmidas ou superúmidas nas demais estações. A altitude varia entre 310,9 a 419,4 m em relação ao nível do mar, o relevo regional varia 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 (*Glycine max*, *Zea mays* e *Nicotiana tabacum*), silvicultura (*Pinus sp.*, *Eucalyptus sp.* e *Acacia sp.*), mata nativa e pastagens que ocupavam 71%, 12%, 10% e 7%, respectivamente, da área da bacia.

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 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.

Em cada ponto amostral, foram coletadas amostras de solo deformadas na camada de 0 a 20 cm para determinar o teor de carbono orgânico pelo método de Walkley-Black (Nelson; Sommers, 1982) e as frações texturais de areia (usando o método de peneiramento), silte e argila pelo método da Pipeta (Gee; Bauder, 1986), também foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada nesta mesma camada, entre 0 e 5 cm, utilizando anéis volumétricos com altura de 5,0 cm e diâmetro interno de 4,8 cm, sendo determinados os seguintes atributos físico-hidráulicos do solo: densidade do solo, porosidade total do solo, macroporosidade e microporosidade. Foi utilizado o método de carga constante (Klute; Dirksen, 1986) para a medição em laboratório da K_{Sat} a partir das amostras coletadas. 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 CRAS em cada ponto amostral (conteúdo de água no solo retido nas tensões de 10; 20; 60; 100; 330; 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. 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 330, 1000, 3000 e 15000 hPa foram determinados por meio da câmara de pressão de Richards. 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).

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 ($\alpha_D = \theta_s - \theta_{cc}$) e a água disponível para as plantas ($PAWC = \theta_{cc} - \theta_{pmp}$) (Armando; Wendroth 2016, 2019; Reichardt; Timm, 2020). Os valores do conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{cc}) foram obtidos a partir da metodologia de

Prevedello (1999), a qual utiliza um método iterativo onde a θ_{cc} é definida como 1% da K_{sat} .

Para o cálculo das funções hidráulico-energéticas a equação VGM foi representada na escala $pF = \log_{10}(h)$ (Equação 4) e foram calculados os índices absolutos de aeração (A_{a-pF}) e retenção de água (WR_{a-pF}) do solo na escala pF (Equações 5 e 6), os índices relativos de aeração (A_{r-pF}) e de retenção de água (WR_{r-pF}) do solo (Equações 7 e 8), além disso foi calculado o índice do potencial relativo ar-água do solo (AW_{r-pF}) (Equação 9).

Foram calculadas as curvas de condutividade hidráulica do solo não saturado a partir da equação 10 e a partir delas foi utilizada a equação 11 para calcular os potenciais de fluxo matricial absolutos (equações 12 e 13) e relativos nas regiões de aeração (equação 14) e de retenção (equação 15), além do potencial de fluxo matricial que demonstra o equilíbrio entre essas regiões (equação 16).

O presente trabalho está articulado em dois artigos distintos:

- No primeiro artigo, diversas propriedades físico-hidráulicas relacionadas à estrutura do solo foram investigadas, resultando na criação de um novo índice integrativo de qualidade física do solo. Esse índice visa apoiar o uso e gerenciamento da água na BHSE, com ênfase na sensibilidade dos índices hidráulico-energéticos baseados na integral das curvas de retenção de água no solo.
- No segundo artigo, foi estabelecida uma escala hierárquica para analisar sistematicamente os processos de aeração, retenção e fluxo de água no solo, oferecendo suporte em situações de tomada de decisão.

5. Artigo 1

Exploring the soil structure analysis of a subtropical watershed by introducing a blanket physico-hydraulic health index

Angelo Garcia Costa^{1*}, Mauricio Fornalski Soares², Marília Alves Brito Pinto³, Miguel Fuentes Guevara⁴, Rômulo Félix Nunes⁵, Douglas Rodrigo Kaiser⁶, Robson André Armindo⁷, Luis Carlos Timm⁸.

¹Soil and Water Conservation and Management Graduate Program, Federal University of Pelotas (UFPel), Capão do Leão (RS), CEP: 96010-610, Brazil. costagarciaangelo@gmail.com *Corresponding Author

²Department of Phytotechnics, Rural Sciences Center, Federal University of Santa Maria (UFSM), Santa Maria (RS), CEP: 97105-900, Brazil. mauriciofornalski@gmail.com

³Agronomy Graduate Program, State University of Southwest Bahia, Vitória da Conquista (BA), CEP: 45083-900, Brazil. ma.agro@gmail.com

⁴Araucária Foundation – Unicentro, Cedeteg Campus, Agronomy Graduate Program, Guarapuava (PR), CEP: 85040-167, Brazil. miguelfuge@hotmail.com

⁵Soil and Water Conservation and Management Graduate Program, Federal University of Pelotas (UFPel), Capão do Leão (RS), CEP: 96010-610, Brazil. nunes.romulo@outlook.com

⁶Federal University of Fronteira Sul (UFFS), Cerro Largo (RS), CEP: 97900-000, Brazil. douglasrodrigokaiser@gmail.com

⁷Department of Physics (DFI), Institute of Natural Sciences (ICN), Federal University of Lavras (UFLA), Mailbox 3037, Lavras (MG), CEP: 37200-900, Brazil. robson.armindo@ufla.br.

⁸Department of Rural Engineering/Eliseu Maciel Agronomy College, Federal University of Pelotas (UFPel), Capão do Leão (RS), CEP: 96160-000, Brazil. lctimm@ufpel.edu.br

Abstract

Multiple disturbed and undisturbed soil samples were collected to assess the soil structure health in support of water use and management in a subtropical watershed, which is composed of shallow Entisols, near to Canguçu, RS state - Brazil. Various physico-hydraulic properties related to soil structure, such as bulk density, total, micro and macroporosity, saturated hydraulic conductivity, organic carbon, soil water retention curve (SWRC), and the ranges of plant available water (*PAWC*) and drainable porosity (*DP*) were measured to be analyzed. The hydraulic-energy indices of soil aeration and water retention were determined by integrating the areas under SWRC. Combining these properties with the contents of sand and clay, a unique blanket soil physico-hydraulic health index (BSPHI) was formulated and applied to investigate the impact of land use and management on the soils of the Ellert Creek watershed (ECW), thereby supporting soil physical health analysis and, consequently, the analysis of water and human health. The favorable outcomes found in the ECW soils under annual crops indicated good root aeration in the surface layer due to the balance between *DP* and *PAWC*. The BSPHI results showed that only about 19% of the areas exhibited unhealthy physical health. The soil structure in pasture areas of ECW was not significantly impacted by the extensive cattle grazing, whereas lands under native forest served as a control for the natural soil quality status. The BSPHI successfully captured small changes in soil structure, regardless of land use and management, highlighting its potential as a promising tool for evaluating soil health by assessing the soil physical quality.

Keywords: Soil water retention curve, soil management, soil physical quality, plant-available water, drainable porosity, soil water integral energy.

1. Introduction

Soil is fundamentally linked to human and planetary health as a natural and non-renewable resource vital to terrestrial ecosystems. The growing population and increasing consumption are placing unprecedented demands on agriculture and natural resources (Foley *et al.*, 2011). Consequently, soil is directly related to several environmental and economic processes, from food production to building support (Várallyay, 2007; Clunes *et al.*, 2022). Understanding the relationship between the soil-water system and the influence of anthropogenic effects are among the main challenges of agricultural, environmental, and hydrological sciences.

Soil health is an integrative term to refer the soil's capability of responding to agricultural interventions to support both agricultural production and the provision of other ecosystem services (Kibblewhite *et al.* 2008). The concept of soil physical quality (SPQ) relates to the soil's capability to promote satisfactory conditions for plant growth and development under various climate conditions (Turek *et al.*, 2019). Several soil physical properties related to soil structure have been used as SPQ indicators for this analysis, such as density, porosity, the contents of plant-available water (PAWC) and drainable porosity (DP), and organic matter (Reynolds *et al.*, 2002, 2009; Pulido-Mocada *et al.*, 2014a, 2014b; Bünemann *et al.*, 2018; Fuentes-Guevara *et al.*, 2022). However, sometimes the results of these indicators tie in a SPQ analysis, then a more comprehensive and global analysis of soil water status is essential for a tiebreaker, examining whether soil use, management, and conservation practices are adequate (Di Prima *et al.*, 2018).

Among various soil physico-hydraulic properties, those related to the soil water retention curve (SWRC) and hydraulic conductivity play a crucial role in soil physical health examination (Minasny and McBratney, 2003; Armindo and Wendroth, 2019). The SWRC shape can be many times a first trace soil type, mineral material, particle and pore size distributions, and primarily the health of the soil skeleton to support plant

development (Reynolds *et al.*, 2002; Dos Reis *et al.*, 2019; Armindo and Wendroth, 2016, 2019). Furthermore, PAWC and DP, as well as their related integral hydraulic-energies, are calculated based on SWRC parameters (Fuentes-Guevara *et al.*, 2022; Bacher *et al.*, 2022) are often utilized as SPQ indicators.

Given the high spatial variation in soil structure, all these related physico-hydraulic properties also exhibit spatial pattern, needing of a wide field-grid catchment for a finer analysis in regard to the use and management of soils (Mamedov *et al.*, 2016; Turek *et al.*, 2021). Under this hypothesis, Fuentes-Guevara *et al.* (2022) evaluated the spatial variation of the hydraulic-energy-based and other SPQ indices to assess the impact of land leveling operations on soil physical health in lowland soils. The authors concluded that these energy indices were well succeed in capturing soil structure changes after leveling operations, opening their application in wide areas, especially in watershed scales.

The cultivation of diverse crops along with the existence of various use and management soil practices are common from the watershed scale perspective. This intense use and management can negatively affect the natural health of soils (Ferro *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2021), implying the need of soil physical health examination in larger scales. The Ellert Creek Watershed (ECW) is a headwater basin whose main watercourse flows directly into the Arroio Pelotas Watershed (APW), a crucial watershed for providing clean and potable water for a population of almost half a million people in Pelotas and Rio Grande, the two largest cities in the southern region of Rio Grande do Sul state - Brazil (Beskow *et al.*, 2016). However, ECW faces soil and nutrient losses leading to economic and social damages due to intensive soil management for agriculture and livestock. Due to all these aspects and because it is a watershed entirely inhabited by smallholder farmers (Soares *et al.*, 2020), ECW was chosen for this study.

Thus, this study aimed to examine the soil use and management of lands in large scale within the entire ECW. As the result of several SPQ indices may tie in this kind of analysis, a blanket soil physico-hydraulic health index (BSPHI), derived from several soil physico-hydraulic properties, was equated and had its performance of providing a global physical tiebreaker result investigated.

2. Material and Methods

2.1. Experimental area

The field catchment was carried out in the Ellert creek watershed (ECW), a headwater watershed of the Pelotas River Watershed (PRW), located near the city of Canguçu, Rio Grande do Sul, Southern Brazil (Figure 1a).

The regional climate is classified as Cfa type, according to Köppen's classification (Alvares *et al.*, 2013), which represents a subtropical environment, with sea influences, sub-humid summers, and humid or super-humid conditions in the remaining seasons. The annual mean temperature and precipitation are of 18°C and 1,350 mm, respectively, in which the latter is well distributed throughout the year. The regional relief shows the predominance of shallow soils varying from undulating to strong undulating with an area of 0.66 km², demarcated in the ECW with altitude elevation ranging from 310.9 to 419.4 m.

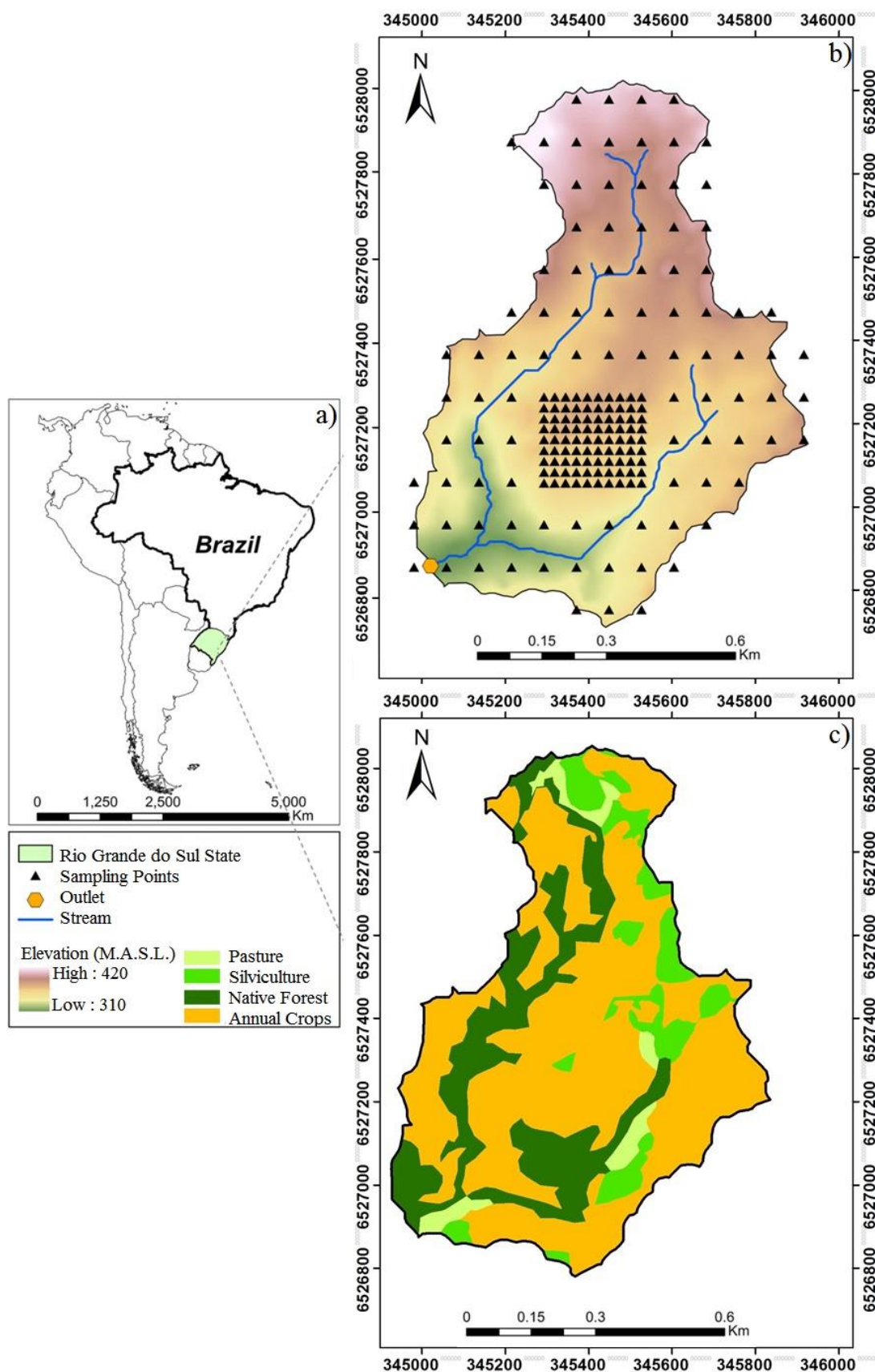


Figure 1 - Location (a), topography, hydrography, sampling points (b) and main land use types (c) in the Ellert Creek Watershed.

According to the soil taxonomy classification (Soil Survey Staff, 2022) of the United States Department of Agriculture (USDA), the shallow soils are located over rocky outcrops, basically comprising the Entisols class. This soil class is commonly found on places with little profile development (A-C or A-R profile), especially in step slopes (Dai *et al.*, 2022). Four different types of land uses (Figure 1c) are identified in the ECW area: the annual crop land use included many types of crops, such as *Glycine max* and *Zea mays*, and occupied 59% of the ECW area, indicating an intensive anthropic soil management practice by farmers. Forest includes native forest sites which accounted for about 17% of the ECW's area; areas of silviculture, planted with *Pinus* sp., *Eucalyptus* sp., and *Acacia* sp., were equivalent to 14% of the ECW area. Pasture areas accounted for 10% of the total area. The demarcation of each point-location in the ECW area was done by using a GPS navigation equipment.

2.2. Sampling and soil physical properties

The experimental sampling grid (Figure 1b) was firstly carried out with systematic methodology, spaced 50 m in the west direction by 75 m in the south direction (50 x 75 m), resulting in 106 points in the first sampling campaign. Unfortunately, the spatial variation of the soil physical properties was not capture, then in order to better capture and describe this variation, a second sampling campaign was necessary and established in the central part of the watershed area, spaced 25 m apart in both directions (25 x 25 m), increasing sampling up to 169 points (Figure 1b).

At each sampling point, disturbed soil samples were collected in the 0-20 cm soil layer to determine the organic carbon (OC) content by the Walkley-Black method (Nelson and Sommers, 1982) and the textural fractions of sand (using the sieving method), silt, and clay by the Pipette method (Gee and Bauder, 1986). At the same soil layer and near

to the points where disturbed samples were gathered, undisturbed samples were taken using steel-volumetric rings with 5-cm-diameter and 3-cm-height to measure SWRCs (volumetric soil water contents (θ) at absolute matric potentials (h) of 10, 20, 60, 100, 330, 1,000 and 15,000 cm). After this procedure, these sample cores were used to determine the bulk density (BD) and total porosity (TP) (Blake and Hartge, 1986). The microporosity (Mic) was assumed as to be equal to $\theta(60 \text{ cm})$ whereas macroporosity (Mac) computed as the water content difference between saturation [θ_s] and $\theta(60 \text{ cm})$.

2.3. Fitting SWRCs and calculating SPQ indices

Each experimental SWRC was fitted to the mathematical model of the van Genuchten-Mualem (1980) (vG), written to the pF scale, $pF = \log_{10}(h)$ (Armindo and Wendroth, 2019; Bacher *et al.*, 2022; Fuentes-Guevara *et al.*, 2022), as follows:

$$\theta(pF) = \theta_{r-pF} + \frac{\theta_{s-pF} - \theta_{r-pF}}{\left[1 + (\alpha_{pF} \cdot pF)^{n_{pF}}\right]^{1-1/n_{pF}}} \quad (1)$$

in which $h(\theta)$ is the absolute matric potential as a function of the volumetric water content, θ_{s-pF} is the saturated water content, θ_{r-pF} is the residual water content, α_{pF} and n_{pF} are fitting parameters based on pF scale.

According to Armindo and Wendroth (2019), the absolute soil aeration energy (A_{a-pF}) and the absolute soil water retention energy (WR_{a-pF}) were equated by:

$$A_{a-pF} = \int_{\theta_{fc-pF}}^{\theta_{s-pF}} pF(\theta) d\theta \quad (2)$$

$$WR_{a-pF} = \int_{\theta_{pwp-pF}}^{\theta_{fc-pF}} pF(\theta) d\theta \quad (3)$$

in which A_{a-pF} and WR_{a-pF} are the absolute hydraulic-energy indices of aeration and water retention, respectively. θ_{s-pF} , θ_{fc-pF} , and θ_{pwp-pF} are the limits of integration and, respectively denote the volumetric soil water content at saturation, field capacity, and permanent wilting point. θ_{s-pF} is a fitting parameter of eq.(1), θ_{fc-pF} was obtained by the

dynamic criterion that establishes that field capacity is obtained when a negligible flux drainage through the time $[(d\theta/dt \rightarrow 0)]$ is reached (See Prevedello, 1999; Armindo and Wendroth, 2016; Turek *et al.*, 2018 and Rab *et al.*, 2023 for more details), and θ_{pwp-pF} was set as the water content at pF value of 4.1761. These limits of integration can also be derived providing additional soil hydraulic properties and soil health indicators, which are the plant-available water capacity ($PAWC$) and drainable porosity (DP), declared as $PAWC = \theta_{fc-pF} - \theta_{pwp-pF}$ and $DP = \theta_{s-pF} - \theta_{fc-pF}$ (Armindo and Wendroth, 2019; Bacher *et al.*, 2021).

After that, the relative hydraulic-energy indices of aeration (A_{r-pF}), water retention (WR_{r-pF}), and air-water (AW_{r-pF}), which are also related to soil physical health, were then quantified (in percentage) to contribute to the soil structure examination in the ECW by the following equations:

$$A_{r-pF} = 100 \left[\frac{A_{a-pF}}{(A_{a-pF} + WR_{a-pF})} \right] \quad (4)$$

$$WR_{r-pF} = 100 \left[\frac{WR_{a-pF}}{(A_{a-pF} + WR_{a-pF})} \right] \quad (5)$$

$$AW_{r-pF} = 100 \left[\frac{A_{a-pF}}{WR_{a-pF}} \right] \quad (6)$$

2.4. The blanket soil physico-hydraulic health index (BSPHI) formulation

It is known that the soil skeleton is a complex tangle of mineral and organic particles that describe a solid structural system, representing the main soil physical attributes indicators. Furthermore, a variety of physical properties are often hierarchically employed to capture information about this structural system in order to assess soil physical health.

Thereby, the original soil material information represented by the granulometric fractions of *clay* [< 0.002 mm] and *sand* [0.05 to 2 mm] were combined with the indices related to soil structure (BD , $PAWC$, DP , A_{a-pF} and WR_{a-pF}) to quantify a unique, comprehensive, and dimensionless index of soil physico-hydraulic health that comprises the phenomena of soil texture composition, compaction, air and water availability, and their related integral energies of aeration and water retention:

$$BSPHI = \left(\frac{sand^{0.6} + DP^{0.5} + A_{a-pF}}{clay^{0.4} + PAWC^2 + WR_{a-pF}} \right) \frac{BD}{\rho_w} \quad (7)$$

in which *sand* and *clay* are expressed in gravimetric fractions ($kg\ kg^{-1}$), $PAWC$ and DP in volumetric fractions ($cm^3\ cm^{-3}$), and A_{a-pF} and WR_{a-pF} are the integral hydraulic-energies ($\log(cm)\ cm^3\ cm^{-3}$). The variables BD and ρ_w (the specific water gravity) are expressed in $g\ cm^{-3}$ to become BD dimensionless and, therefore, the BSPHI result is also dimensionless.

The term “physico-hydraulic” was better appropriate to nominate this index because any soil thermal variable is directly described in eq.(7), thus BSPHI may not be referred as a pure “blanket physical” index, although it is known that variables such as thermal diffusivity, conductivity, and specific heat are described as functions of the soil water content, which is evidently manifested in $PAWC$, DP , A_{a-pF} , and WR_{a-pF} due to the SWRC. The BSPHI comprises a balance between aeration process in regard to the water retention phenomenon, along with soil compaction by the variable BD . *Sand*, DP and A_{a-pF} are more associated with the air-entrance by the water drainage, whereas *clay*, $PAWC$, and WR_{a-pF} are related to the water retention. The additions present in both numerator and denominator of eq.(7) is only possible because $kg\ kg^{-1}$, $cm^3\ cm^{-3}$ and $\log(cm)\ cm^3\ cm^{-3}$ are physically dimensionless units. The exponents associated with the variables *sand*, *clay*, $PAWC$ and DP were utilized after several simulations to underscore a larger and equilibrated weight to the water retention process in regard to the process of soil aeration.

As long as *OC* influences the shape of the *SWRC* and subsequently impact the *PAWC*, *DP*, *A_{a-pF}*, and *WR_{a-pF}* data (Armino and Wendroth, 2016), this variable was not incorporated in eq.(7) to become it easier to get. Furthermore, it is recognized that soil volume increases with the rise of organic matter (OM), resulting in a negative linear correlation between *BD* and *OC*.

Consequently, the threshold limit ranges of BSPHI were linked to *BD* values to establish the classification of soil physical health (SPH), categorized as excellent, good, fair, unhealth, and very unhealthy (Table 1). These BSPHI threshold ranges were yielded by simulating data ranges of those variables that comprise eq.(7) under scenarios of crop growth, based on the understanding of the ECW soils (texture, use, and management) and crop production. As long as this blanket index may be applied in any soil evaluation, it is recognized that these threshold limit ranges were derived only for the ECW soils, thus it advisable to assess whether they are suitable for other soil locations before their utilization.

1 Table 1 – Threshold limit ranges of the blanket soil physico-hydraulic health index (*BSPHI*) for the *ECW* soils.

	BD (g cm ⁻³)																	
SPH classification	0.8	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65
Excellent	<0.83	<0.89	<0.94	<0.99	<1.04	<1.09	<1.15	<1.20	<1.25	<1.30	<1.35	<1.41	<1.46	<1.51	<1.56	<1.62	<1.67	<1.72
Good	0.83- 0.91	0.89- 0.97	0.94- 1.03	0.99- 1.09	1.04- 1.14	1.09- 1.20	1.15- 1.26	1.20- 1.31	1.25- 1.37	1.30- 1.42	1.35- 1.48	1.41- 1.55	1.46- 1.60	1.51- 1.66	1.56- 1.71	1.62- 1.77	1.67- 1.83	1.72- 1.88
Fair	0.92- 1.00	0.98- 1.07	1.04- 1.13	1.10- 1.19	1.15- 1.25	1.21- 1.31	1.27- 1.38	1.32- 1.44	1.38- 1.50	1.43- 1.56	1.49- 1.62	1.56- 1.69	1.61- 1.76	1.67- 1.82	1.72- 1.87	1.78- 1.94	1.84- 1.99	1.89- 2.05
Unhealth	1.01- 1.09	1.08- 1.16	1.14- 1.23	1.20- 1.30	1.26- 1.36	1.32- 1.43	1.39- 1.50	1.45- 1.56	1.51- 1.63	1.57- 1.69	1.63- 1.76	1.70- 1.84	1.77- 1.91	1.83- 1.98	1.88- 2.03	1.95- 2.10	2.00- 2.16	2.06- 2.22
Very Unhealthy	>1.09	>1.16	>1.23	>1.30	>1.36	>1.43	>1.50	>1.56	>1.63	>1.69	>1.76	>1.84	>1.91	>1.98	>2.03	>2.10	>2.16	>2.22

2 SPH: soil physical health and BD: bulk density.

3

Based on several studies (Table 2), a critical bulk density (BD_{crit}) value of 1.65 g cm^{-3} was adopted in this study to examine the ECW soils. Thus, any BD result exceeding this threshold was deemed limiting for plant growth and indicative of unsatisfactory soil physical health (unhealth or very unhealthy). Reinert et al. (2008) identified three BD levels in an Ultisol based on the analysis of root profiles of cover crops and the soil density data. These levels were classified as low (less than 1.75 g cm^{-3}), medium (between 1.75 and 1.85 g cm^{-3}), and high (greater than 1.85 g cm^{-3}). At the low-density level, no significant changes in root morphology were reported. At the medium-density level, the root system showed thickening, deviations, and moderate branching, with less impact on depth growth. At the critical high-density level, the root system faced growth difficulties. Modifications in root morphology, such as significant thickening, deviations at angles up to 90° , and, in severe cases, prevention of taproot growth, were observed. Reichert et al. (2009) reported about critical BD threshold limits considering other soil properties such as porosity and hydraulic conductivity. However, optimal and critical limit BD ranges for crop growth and development can be also related to other soil physical properties, such as texture, mineral composition, morphology, and OM content. Understanding these properties is also important for comprehending soil structure and the processes of soil mass (water, air, and solutes) and energy transport. Thus, Eq.(7) and Table 1 were applied to analyze the soil physical health for BD values below or equal to 1.65 g cm^{-3} .

Table 2 – Critical bulk density for different soil textures according to various authors.

Paper's authors	Texture	$BD_{crit} (\text{g cm}^{-3})$
Veihmeier & Hendrickson (1948)	Loam and Sand	1.60-1.80
Reichert <i>et al.</i> (2003)	Loam and Sand	1.70-1.80
Santos <i>et al.</i> (2005)	Sand	1.68
Santos <i>et al.</i> (2005)	Sandy clay loam	1.57

Reichert <i>et al.</i> (2009)	Coarse soils	1.70-1.75
Suzuki <i>et al.</i> (2022)	Sandy loam	1.66
Suzuki <i>et al.</i> (2022)	Loam and Clay loam	1.52

2.5. Data analysis

Results were initially analyzed using descriptive statistics, which provided measures of central tendency (mean and median), dispersion (standard deviation, variance, and coefficient of variation (CV)), and distribution shape indices (skewness and kurtosis). The Shapiro-Wilk (S-W) test was conducted at a significance level of 5% to assess the normality of each dataset, as it is considered the most robust normality test (Razali & Wah, 2011). The Tukey test was utilized to identify significant differences among the means ($p \leq 0.05$). Boxplots were employed for visual representation of the distribution within each land use category.

Principal component analysis (PCA) was performed to evaluate the relationship between soil physical properties and their association with land use types. Selected SWRC parameters and hydraulic-energy indices were included in the PCA to avoid redundancy and ensure a comprehensive understanding of soil characteristics. The analysis was carried out using R-Project software (R Core Team, 2024).

Additionally, the BSPHI results were classified according to Table 1 (as excellent, good, fair, unhealth, or very unhealthy) for the four different land use types, and the distribution of BSPHI percentages within each land use was examined.

3. Results

3.1. Exploratory analysis

The smallest mean BD value was found in the area with native forest, while the largest value was identified in the area with annual crops using a conventional system (Table 3 and

Figure 2). Soils under annual crops, native forest, and silviculture are sandy loam, while pasture soils are loamy. Considering these textural classes, all areas showed mean BD values below those considered critical by Suzuki et al. (2022) for sandy loam and loam soils.

High levels of macroporosity were observed in all land uses, characteristic of Entisols with mean sand content > 50% and clay content < 25%. The largest average TP and Mac were found in the land under native forest, followed by the area under silviculture and mean Mic in the 0-20 cm layer did not vary among different land uses (Table 3 and Figure 2).

Significant differences in hydraulic conductivity written on the logarithm basis ($\text{Log}_{10}K_{sat}$) were observed among different soil managements (Figure 2). Globally, forests or no-tillage systems typically exhibit higher OC content compared to other land uses. However, in this watershed, OC mean results of all land uses were not statistically different (Table 1 and Figure 2).

Table 3 - Soil physical properties according to samples collected in ECW with different land uses

Annual crops										Native forest								
	<i>Sand</i>	<i>Clay</i>	<i>Silt</i>	<i>BD</i>	<i>TP</i>	<i>Mic</i>	<i>Mac</i>	<i>OC</i>	<i>LogK_{sat}</i>	<i>Sand</i>	<i>Clay</i>	<i>Silt</i>	<i>BD</i>	<i>TP</i>	<i>Mic</i>	<i>Mac</i>	<i>OC</i>	<i>LogK_{sat}</i>
Minimum	30.75	4.72	8.76	0.90	33.76	13.13	6.44	0.15	0.96	30.22	6.89	10.54	0.81	40.36	11.44	8.45	0.13	1.48
Maximum	83.11	45.88	50.96	1.76	66.10	31.11	44.01	2.22	3.58	75.31	52.71	38.10	1.58	69.54	36.77	46.69	2.66	3.54
Mean	58.64	19.18	22.18	1.45	45.28	20.38	24.90	1.08	2.60	49.26	22.07	28.67	1.23	53.58	21.59	31.99	1.10	2.98
S	12.01	7.91	8.98	0.14	5.14	4.18	7.00	0.47	0.56	10.89	10.33	6.53	9.51	6.26	6.26	8.99	0.65	0.49
CV	0.20	0.41	0.40	0.09	0.11	0.21	0.28	0.44	21.46	0.22	0.47	0.23	0.18	0.29	0.29	0.28	0.59	16.30
Kurt.	-0.77	1.40	-0.04	1.18	1.18	-0.58	-0.01	-1.05	0.35	0.50	1.38	-1.30	0.28	0.85	0.85	-0.60	0.51	4.56
Skew.	-0.08	1.03	0.74	-0.46	0.46	0.38	-0.44	-0.34	-0.73	0.07	2.38	1.77	-1.29	0.32	0.32	1.03	-0.12	-1.84
S-W	0.98	0.94	0.92	0.98	0.98	0.97	0.97	0.92	0.96	0.97	0.89	0.88	0.92	0.92	0.94	0.94	0.96	0.84
p-value	0.07	0.00	0.00	0.05	0.05	0.01	0.02	0.00	0.00	0.83	0.04	0.02	0.14	0.14	0.25	0.28	0.58	0.01
Silviculture										Pasture								
	<i>Sand</i>	<i>Clay</i>	<i>Silt</i>	<i>BD</i>	<i>TP</i>	<i>Mic</i>	<i>Mac</i>	<i>OC</i>	<i>LogK_{sat}</i>	<i>Sand</i>	<i>Clay</i>	<i>Silt</i>	<i>BD</i>	<i>TP</i>	<i>Mic</i>	<i>Mac</i>	<i>OC</i>	<i>LogK_{sat}</i>
Minimum	34.43	7.84	10.96	0.90	38.43	14.11	16.20	0.13	1.56	36.85	6.55	21.74	1.13	39.56	15.41	12.80	0.32	1.32
Maximum	80.94	26.98	46.75	1.63	65.93	47.54	49.60	2.12	3.50	65.74	35.44	38.86	1.60	57.33	35.24	36.21	2.52	3.16
Mean	54.91	19.59	25.50	1.35	48.91	20.76	28.15	0.94	2.71	52.74	19.47	27.79	1.40	47.05	22.53	24.52	1.21	2.46
S	11.73	5.02	9.95	0.20	7.37	7.35	7.88	0.50	0.50	10.97	9.45	4.46	0.13	4.84	5.98	6.34	0.64	0.57
CV	0.21	0.26	0.39	0.14	0.15	0.35	0.28	0.53	18.49	0.21	0.49	0.16	0.09	0.10	0.27	0.26	0.53	23.07
Kurt.	0.53	-0.83	0.16	-0.72	0.72	2.50	0.76	0.66	-0.17	-0.33	0.34	1.47	-0.43	0.43	0.91	0.10	0.45	0.21
Skew.	-0.24	-0.03	-0.47	0.13	0.13	6.95	0.91	-0.19	-0.36	-1.62	-1.07	2.15	0.58	0.58	0.16	0.11	0.12	-0.75
S-W	0.95	0.92	0.91	0.94	0.94	0.72	0.94	0.94	0.97	0.85	0.95	0.83	0.88	0.88	0.91	0.96	0.93	0.95
p-value	34.43	7.84	10.96	0.90	38.43	14.11	16.20	0.13	0.82	0.05	0.63	0.03	0.14	0.14	0.31	0.73	0.42	0.65

in which *BD*: Bulk density (g cm^{-3}), *TP*: Total porosity (%), *Mic*: Microporosity (%), *Mac*: Macroporosity (%), *OC*: Soil Organic Carbon (g cm^{-3}), *LogK_{sat}*: Saturated hydraulic conductivity (mm/h) in *Log10* basis, *Sand* (%), *Clay* (%), *Silt* (%), *S*: Standard deviation, *CV*: coefficient of variation, *Kurt*: kurtosis, *Skew*: Skewness, *S-W*: Shapiro-Wilk normality test with 5% of significance level and *p-value*: Probability of significance.

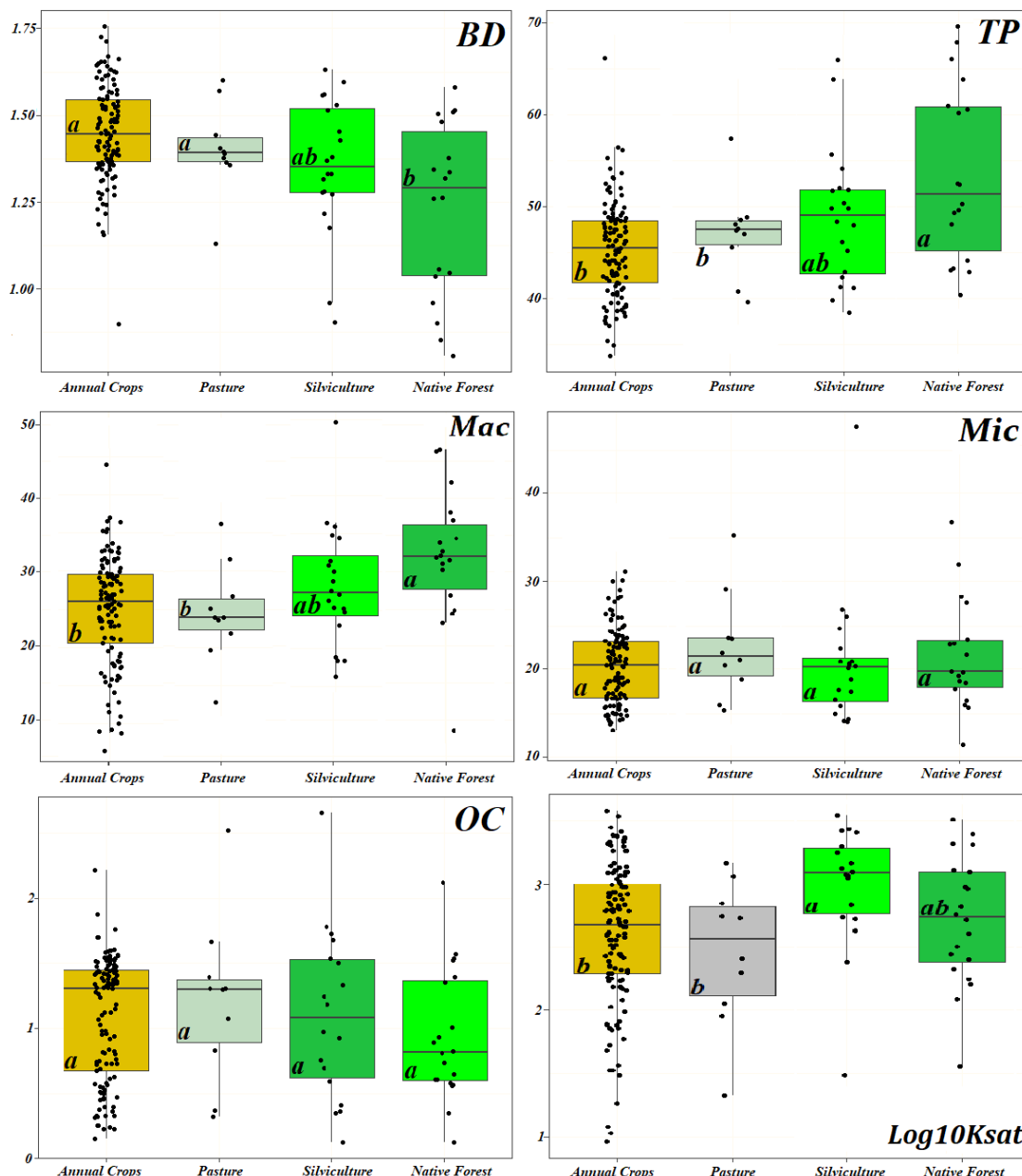


Figure 2 - Boxplots with Tukey Test for soil physical properties according to samples collected in ECW with different land uses. In which *BD* is bulk density (g cm^{-3}), *TP* is total porosity (%), *Mic* is microporosity (%), *Mac* is Macroporosity (%), *OC* is organic carbon (g cm^{-3}), and *Log₁₀K_{sat}* is saturated hydraulic conductivity (mm/h) in *Log₁₀* basis. Boxes followed by the same lowercase letters do not differ according to the Tukey test at the 5% significance level.

The soil under native forest showed the largest mean values of θ_{s-pF} , θ_{fc-pF} , and θ_{pwp-pF} (Table 4 and Figure 3). Similar results were also identified by Kiani *et al.* (2017). The soil under pasture showed the lowest mean values of θ_{s-pF} and θ_{fc-pF} (Table 4 and Figure 3). Kelishadi *et*

al. (2014) reported similar behavior in their study of a soil with low hydraulic conductivity due to the high compaction degree.

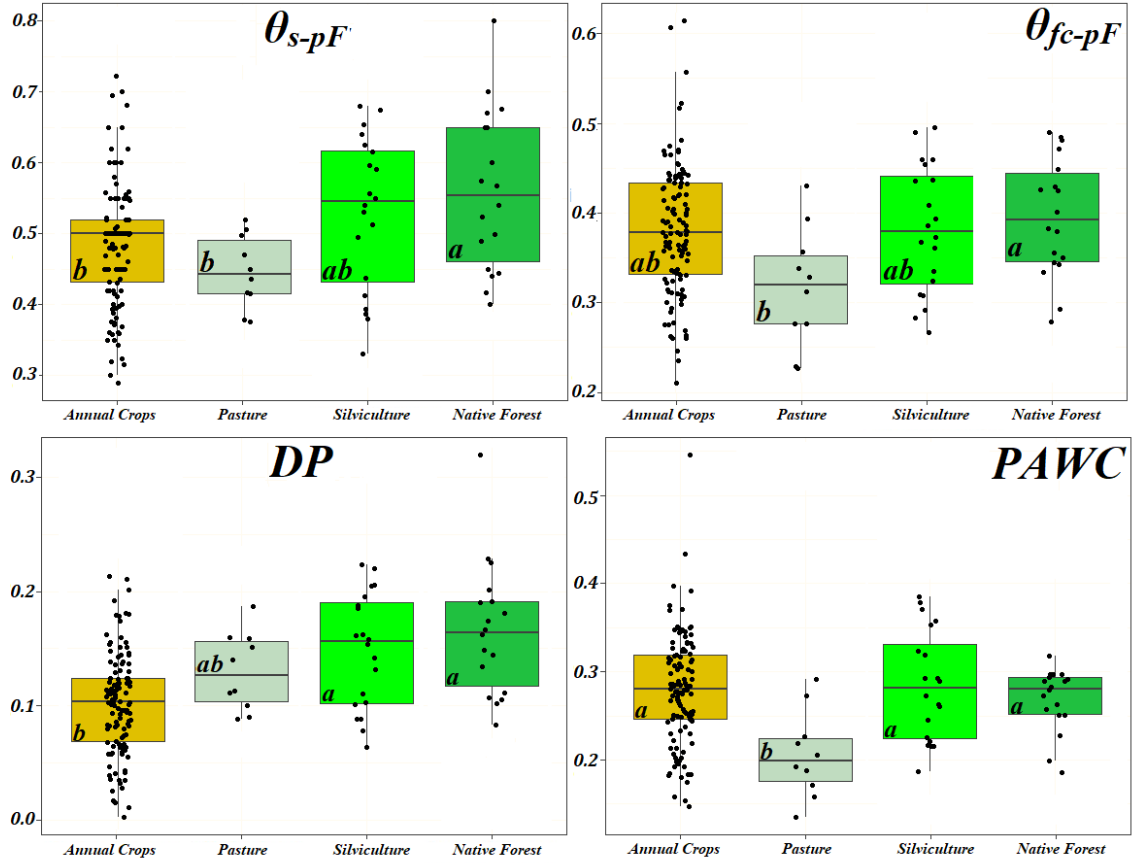
The soil under annual crops disclosed the smallest mean values of A_{r-pF} and AW_{r-pF} and the largest mean values of WR_{r-pF} (Table 5 and Figure 4). In this study, soils under native forest and pasture used about 80% of hydraulic energy associated with the water retention range (WR_{r-pF}), leaving about 20% of energy for soil aeration (A_{r-pF}). This latter energy was smaller for soils under annual crops and silviculture (Table 5 and Figure 4). All land uses showed mean $PAWC$ results $\geq 20\%$ and a high mean DP result was also noted in soils under native forest and the highest mean WR_{a-pF} was identified in the soil under silviculture (Table 5 and Figure 4).

The soil under pasture showed the lowest mean WR_{a-pF} among all land uses but also the highest mean AW_{r-pF} (Table 5 and Figure 4). In this study, $PAWC$ showed a statistical difference only in soil structure in pasture, as indicated by hfc , θ_{fc-pF} , and n_{pF} (Table 3 and Figure 2). Differences in DP data were confirmed by variations in A_{a-pF} , A_{r-pF} , and AW_{r-pF} (Table 5 and Figure 4).

272 Table 4 - SWRC’ parameters and their derived physico-hydraulic properties for soils under different land uses.

Annual crops								Native forest						
	θ_{s-pF}	θ_{r-pF}	α_{pF}	n_{pF}	h_{fc}	θ_{fc-pF}	θ_{pwp-pF}	θ_{s-pF}	θ_{r-pF}	α_{pF}	n_{pF}	h_{fc}	θ_{fc-pF}	θ_{pwp-pF}
Minimum	0.290	0.000	0.465	1.902	1.37	0.211	0.044	0.400	0.008	0.545	2.533	6.55	0.279	0.043
Maximum	0.722	0.294	1.637	5.000	56.49	0.614	0.340	0.800	0.247	1.181	5.088	43.81	0.489	0.257
Mean	0.483	0.044	0.827	2.818	11.54	0.382	0.101	0.561	0.100	0.853	3.465	16.23	0.395	0.127
S	0.085	0.044	0.166	0.569	8.66	0.071	0.037	0.113	0.067	0.160	0.702	10.10	0.066	0.056
CV	0.175	1.001	0.200	0.202	0.75	0.187	0.367	0.202	0.664	0.187	0.203	0.62	0.166	0.443
Kurt.	0.358	7.295	3.956	1.411	6.00	0.694	13.257	0.350	0.447	0.037	0.684	1.29	-0.106	0.606
Skew.	0.185	1.831	0.960	0.989	2.04	0.331	2.666	-0.789	-0.400	-0.522	-0.275	1.01	-1.073	-0.252
S-W	0.971	0.836	0.945	0.936	0.82	0.980	0.813	0.957	0.960	0.969	0.944	0.84	0.950	0.955
p-value	0.009	0.000	0.000	0.000	0.00	0.067	0.000	0.538	0.598	0.771	0.335	0.01	0.421	0.512
Silviculture								Pasture						
	θ_{s-pF}	θ_{r-pF}	α_{pF}	n_{pF}	h_{fc}	θ_{fc-pF}	θ_{pwp-pF}	θ_{s-pF}	θ_{r-pF}	α_{pF}	n_{pF}	h_{fc}	θ_{fc-pF}	θ_{pwp-pF}
Minimum	0.330	0.000	0.529	2.446	4.58	0.266	0.050	0.376	0.025	0.463	2.399	6.81	0.227	0.039
Maximum	0.680	0.163	1.331	4.682	37.11	0.495	0.176	0.520	0.181	0.870	5.364	114.10	0.430	0.201
Mean	0.530	0.063	0.843	3.233	14.85	0.382	0.098	0.447	0.089	0.674	4.160	39.36	0.317	0.111
S	0.108	0.043	0.189	0.555	8.86	0.071	0.033	0.051	0.063	0.133	1.041	31.73	0.067	0.062
CV	0.204	0.675	0.225	0.172	0.60	0.187	0.338	0.115	0.707	0.197	0.250	0.81	0.211	0.559
Kurt.	-0.327	0.290	0.725	0.951	1.24	0.003	1.016	0.022	0.711	0.040	-0.452	1.31	0.170	0.432
Skew.	-1.120	-0.037	0.625	0.664	0.60	-1.220	0.651	-1.281	-1.242	-1.103	-1.153	1.13	-0.930	-1.456
S-W	0.940	0.947	0.953	0.925	0.84	0.953	0.906	0.941	0.784	0.961	0.921	0.86	0.962	0.865
p-value	0.240	0.330	0.421	0.125	0.00	0.422	0.054	0.560	0.009	0.802	0.363	0.08	0.804	0.088

273 In which θ_{s-pF} : volumetric water content at the saturation point ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{r-pF} : residual water content ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), α_{pF} : SWRC scale factor, n_{pF} : shape parameter, h_{fc} : suction
274 head at field capacity (cm), θ_{fc-pF} : volumetric water content at field capacity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{pwp-pF} : volumetric water content at permanent wilting point ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), S: Standard
275 deviation; CV: coefficient of variation, Kurt: kurtosis, Skew: Skewness, S-W: Shapiro-Wilk normality test with 5% of significance level and p-value: Probability of significance.



276

277 Figure 3 - Boxplots with Tukey Test for parameters of eq.(1) and their derived physical-
 278 hydraulic properties for soils under different land uses, in which θ_{s-pF} is saturated volumetric
 279 water content ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{fc-pF} is volumetric water content at field capacity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), DP is
 280 drainable porosity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), $PAWC$ is plant available water content ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). Boxes
 281 followed by the same lowercase letters do not differ according to the Tukey test at the 5%
 282 significance level.

283 Table 5 - Hydraulic-energy indices obtained from soil samples collected in regions occupied by different land uses.

Annual crops								Native forest						
	<i>DP</i>	<i>PAWC</i>	<i>A_{a-pF}</i>	<i>WR_{a-pF}</i>	<i>A_{r-pF}</i>	<i>WR_{r-pF}</i>	<i>AW_{r-pF}</i>	<i>DP</i>	<i>PAWC</i>	<i>A_{a-pF}</i>	<i>WR_{a-pF}</i>	<i>A_{r-pF}</i>	<i>WR_{r-pF}</i>	<i>AW_{r-pF}</i>
Minimum	0.002	0.147	0.000	0.301	0.05	67.64	0.05	0.083	0.185	0.054	0.371	9.42	60.44	10.40
Maximum	0.213	0.545	0.239	0.795	32.36	99.95	47.85	0.319	0.317	0.335	0.604	39.56	90.58	65.46
Mean	0.102	0.281	0.074	0.538	11.91	88.09	14.25	0.165	0.269	0.139	0.514	20.68	79.32	27.36
S	0.044	0.061	0.046	0.084	6.91	6.91	9.44	0.058	0.036	0.068	0.053	7.85	7.85	13.86
CV	0.431	0.217	0.618	0.156	0.58	0.08	0.66	0.349	0.132	0.492	0.103	0.38	0.10	0.51
Kurt.	-0.124	2.009	1.143	-0.099	-0.09	-0.09	1.18	0.878	-1.052	1.299	-0.768	0.69	-0.69	1.20
Skew.	0.125	0.503	0.837	0.045	0.43	-0.43	0.91	0.881	0.290	1.856	1.313	0.04	0.04	1.21
S-W	0.991	0.966	0.951	0.993	0.97	0.97	0.94	0.935	0.884	0.891	0.937	0.96	0.96	0.90
p-value	0.583	0.004	0.000	0.804	0.01	0.01	0.00	0.240	0.030	0.041	0.254	0.52	0.52	0.06
Silviculture								Pasture						
	<i>DP</i>	<i>PAWC</i>	<i>A_{a-pF}</i>	<i>WR_{a-pF}</i>	<i>A_{r-pF}</i>	<i>WR_{r-pF}</i>	<i>AW_{r-pF}</i>	<i>DP</i>	<i>PAWC</i>	<i>A_{a-pF}</i>	<i>WR_{a-pF}</i>	<i>A_{r-pF}</i>	<i>WR_{r-pF}</i>	<i>AW_{r-pF}</i>
Minimum	0.064	0.187	0.044	0.409	8.96	66.06	9.85	0.088	0.135	0.050	0.354	8.29	61.42	9.04
Maximum	0.223	0.385	0.224	0.709	33.94	91.04	51.38	0.187	0.291	0.223	0.555	38.58	91.71	62.81
Mean	0.148	0.284	0.117	0.546	17.44	82.56	21.94	0.130	0.206	0.145	0.448	24.47	75.53	34.04
S	0.050	0.062	0.051	0.092	6.67	6.67	10.69	0.034	0.049	0.054	0.067	8.93	8.93	15.60
CV	0.340	0.218	0.438	0.169	0.38	0.08	0.49	0.261	0.236	0.375	0.149	0.36	0.12	0.46
Kurt.	-0.102	0.204	0.542	0.243	0.80	-0.80	1.20	0.213	0.414	-0.413	0.233	-0.37	0.37	0.09
Skew.	-1.270	-1.206	-0.691	-1.139	0.17	0.17	1.12	-1.253	-0.693	-0.812	-0.938	-0.60	-0.60	-0.47
S-W	0.944	0.938	0.948	0.941	0.93	0.93	0.89	0.928	0.965	0.965	0.955	0.96	0.96	0.97
p-value	0.288	0.220	0.344	0.251	0.18	0.18	0.03	0.431	0.842	0.839	0.733	0.79	0.79	0.88

284 In which *DP*: Drainable porosity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); *PAWC*: Plant available water content ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); *A_{a-pF}*: Absolute aeration energy index [$\log(\text{cm}) \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]; *A_{r-pF}*: Relative aeration
285 energy index (%); *WR_{a-pF}*: Absolute water retention energy index [$\log(\text{cm}) \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]; *WR_{r-pF}*: Relative water retention energy index (%); *AW_{r-pF}*: Relative air-water energy (%);
286 S: Standard deviation; CV: coefficient of variation, Kurt: kurtosis, Skew: Skewness, S-W: Shapiro-Wilk normality test with 5% of significance level and p-value: Probability
287 of significance.

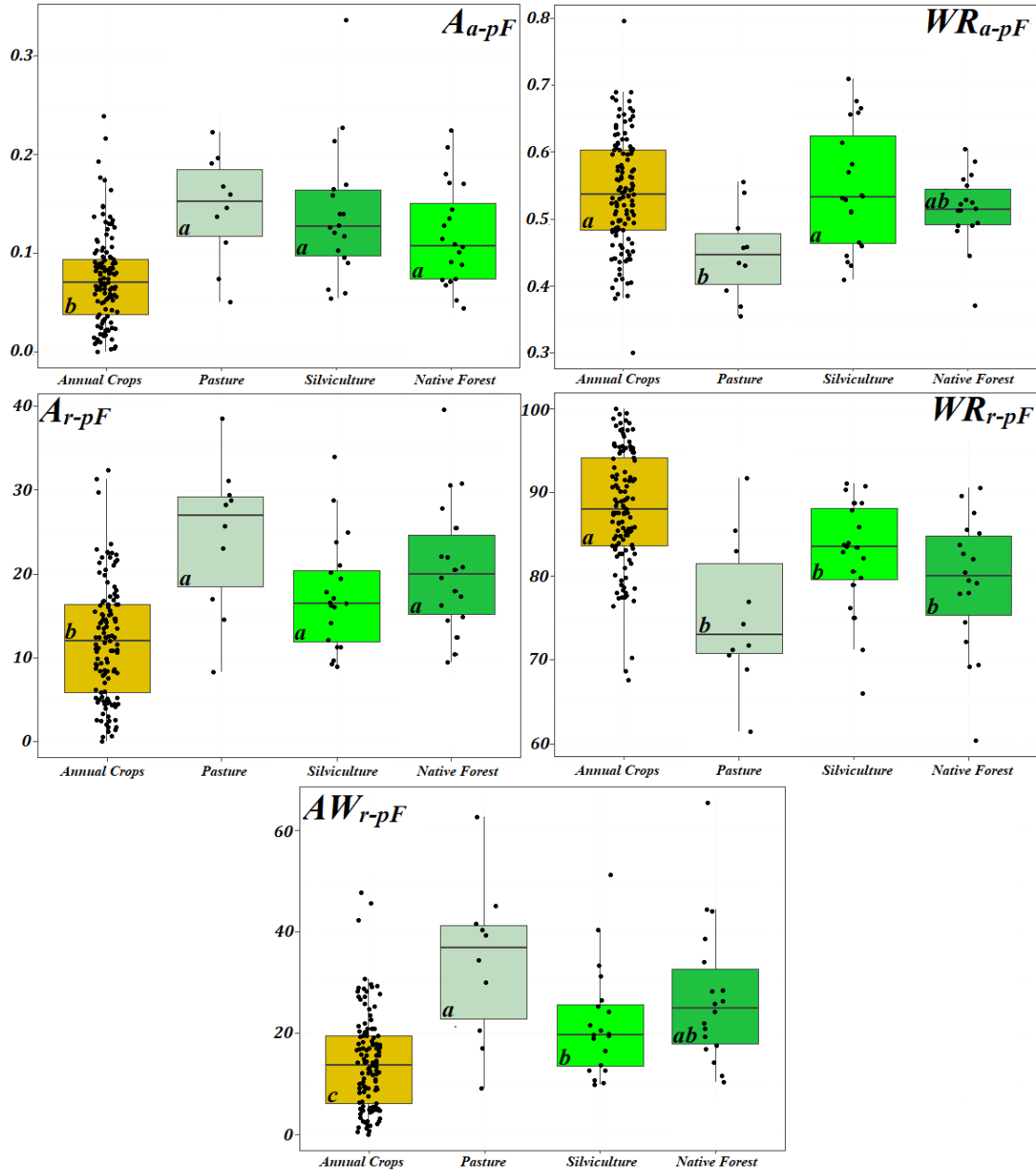


Figure 4 - Boxplots with Tukey Test for the hydraulic-energy indices by type of land use, in which A_{a-pF} is absolute aeration energy ($\log(\text{cm}) \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), A_{r-pF} is relative aeration energy (%), WR_{a-pF} is absolute water retention energy ($\log(\text{cm}) \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), WR_{r-pF} is relative water retention energy (%), and AW_{r-pF} is relative air-water energy (%). Boxes followed by the same lowercase letters do not differ according to the Tukey test at the 5% significance level.

3.2. Relationship between soil physical-hydraulic properties and land uses

The index described in eq.(7) was firstly mind-modeled by the seventh author of this study for then to be addressed in practical analyses. Thus, in order to verify possible

linear combinations and physical correlations between the variables used in that equation and the BSPHI index, a principal component analysis (PCA) was applied. The combination amongst physical soil properties and hydraulic-energy indices previously analyzed (Figures 2, 3 and 4) exhibited that the first dimension explained about 32%, the second 26.7% and the third 14.7% of the total variance (Figure 5). The first dimension showed the highest positive correlation for DP , A_{a-pF} , A_{r-pF} , and AW_{r-pF} whereas WR_{r-pF} and $sand$ showed negatively the highest correlation, explaining the opposite behaviors between aeration (DP) and water retention ($PAWC$) processes, also demonstrating the importance of sand in the structure of this watershed.

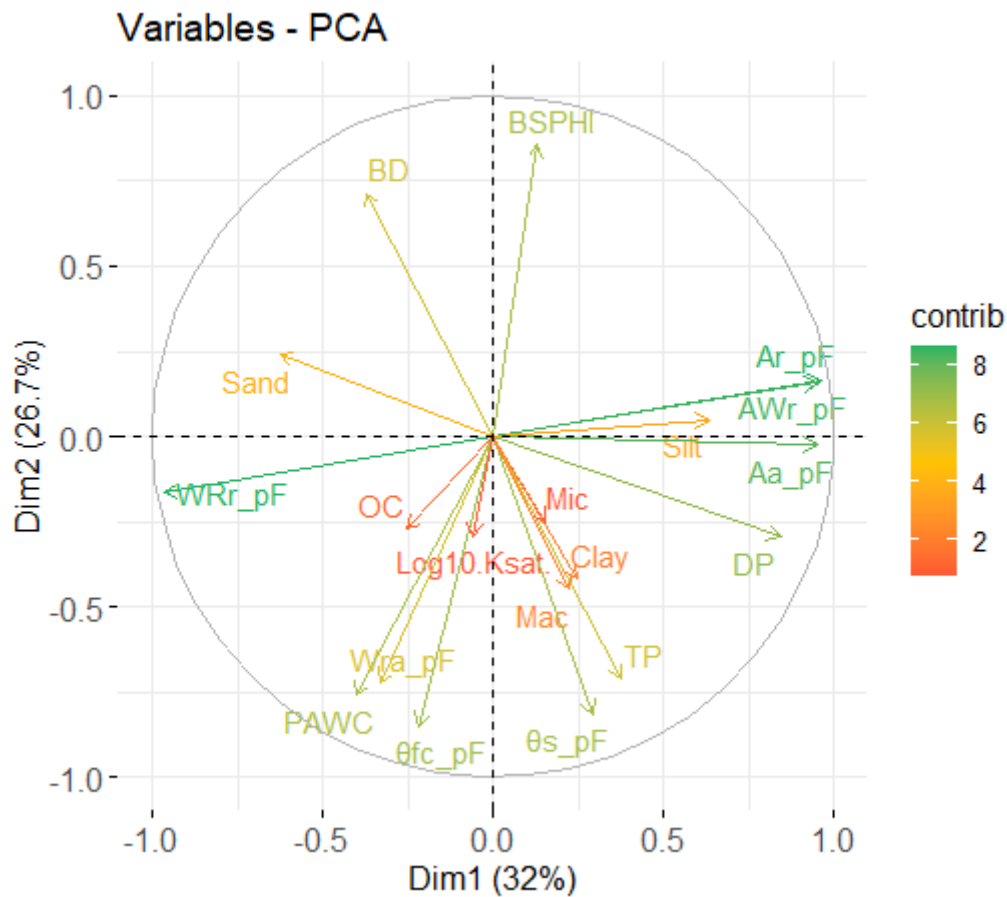


Figure 5 - Eigenvectors of the soil physical properties, hydraulic-energy indices, and clustering of the land uses. In which, Dim1: Dimension 1, Dim2: Dimension 2 and contrib: Contribution.

In the second dimension, as expected, the highest positive correlations were found with BD and BSPHI while TP, PAWC, θ_{s-pF} , θ_{fc-pF} and WR_{a-pF} presented the highest negative correlations (Figure 5). This component can be interpreted by the soil mass/volume and water storage; increasing soil porosity, especially Mac, results in lower BD and higher TP and θ_{s-pF} , a well-known soil physical health. The benefits provided by these effects in soils can be found in Xing *et al.* (2018).

In the third dimension, the highest positive correlations were with $\text{Log}_{10}(K_{sat})$ and Mac, in the other side, the highest correlation among negative values was found in Mic and Clay (Figure 5). This result highlights the effect of microporosity in enhancing water retention and reducing the water flux; plus, there was a positive correlation between Mac and some properties such as K_{sat} and OC content.

3.3. Blanket soil physico-hydraulic health index (BSPHI)

The favorable outcomes observed in the ECW's soils under annual crops (Table 6) indicate a great root aeration in the surface layer due to a balanced ratio between the volumetric fractions of drainable and retained water (DP and $PAWC$). Despite annual crop cultivation usually leads to compacted soil areas due to the intense agricultural machinery, the BSPHI data showed that only about 19% of regions lacked good physical health. These results are supported by the optimum mean levels of BD, TP, Mac, Mic, θ_{s-pF} , θ_{fc-pF} , $PAWC$, and DP which can be attributed to the frequent practice of subsoiling that resulting in a predominance of 'excellent' physical health status in the studied soil layer (0-20 cm) of annual crop land. Areas with pasture may exhibit a degraded surface soil layer due to extensive cattle grazing, but they did not show a significant impact on soil structure in the ECW's soils based on the previously mean values of BD, TP, Mac, Mic, θ_{s-pF} , θ_{fc-pF} , $PAWC$, and DP . Native forest land use served as a control to the natural

soil quality of the study area, corroborating the discussions presented in the previous sections.

Table 6 – Number of sample units and relative percentage for each BSPHI result classification.

Use	N	Excellent	Good	Fair	Unhealth	Very Unhealthy
Annual Crops	121	78 (65%)	15 (12%)	5 (4%)	16 (13%)	7 (6%)
Pasture	10	3 (30%)	2 (20%)	2 (20%)	0 (0%)	3 (30%)
Native Forest	18	9 (50%)	2 (11%)	5 (28%)	0 (0%)	2 (11%)
Silviculture	20	11 (55%)	3 (15%)	5 (25%)	0 (0%)	1 (5%)

To better illustrate the analysis based on the BSPHI results, some samples of sandy loam texture were selected for each land use (Table 7). This demonstrates the sensitivity of BSPHI data in capturing small alterations in soil structure and, consequently, in soil physical health, regardless of land use and management.

Table 7 – The sensitivity of BSPHI in ECW.

<i>Soil Use</i>	<i>Sand</i>	<i>Clay</i>	<i>DP</i>	<i>PAWC</i>	<i>A_{a-pF}</i>	<i>WR_{a-pF}</i>	<i>BD</i>	<i>BSPHI</i>
Annual Crops	52.38	12.29	0.096	0.276	0.053	0.508	1.47	1.50 (Excellent)
Annual Crops	54.56	13.83	0.124	0.268	0.084	0.501	1.42	1.57 (Good)
Annual Crops	52.47	12.53	0.114	0.213	0.105	0.426	1.53	1.90 (Fair)
Annual Crops	56.87	10.61	0.118	0.202	0.102	0.435	1.48	1.93 (Unhealth)
Annual Crops	55.60	15.07	0.202	0.230	0.177	0.417	1.38	1.95 (Very Unhealthy)
Pasture	60.92	12.85	0.090	0.291	0.050	0.554	1.41	1.39 (Excellent)
Pasture	61.69	10.14	0.140	0.272	0.111	0.539	1.44	1.76 (Fair)
Pasture	61.51	12.57	0.088	0.135	0.146	0.369	1.13	1.63 (Very Unhealthy)
Native Forest*	47.96	23.36	0.167	0.297	0.120	0.549	1.34	1.31 (Excellent)
Native Forest	56.26	13.59	0.134	0.279	0.090	0.515	1.69	1.51 (Good)
Native Forest	53.55	17.24	0.225	0.290	0.169	0.494	1.30	1.05 (Fair)

Native Forest	57.86	14.66	0.190	0.228	0.213	0.483	1.17	0.85 (Very Unhealthy)
Silviculture	56.45	12.33	0.088	0.263	0.074	0.582	1.38	1.37 (Excellent)
Silviculture	56.50	13.60	0.132	0.378	0.068	0.666	1.51	1.57 (Good)
Silviculture	74.57	11.05	0.110	0.215	0.088	0.431	1.56	1.90 (Fair)

In which DP : Drainable porosity ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); $PAWC$: Plant available water content ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); A_{a-pF} : Absolute aeration energy index [$\log(\text{cm}) \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$]; WR_{a-pF} : Absolute water retention energy index [$\log(\text{cm}) \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$]. *The sandy loam texture was not identified for this sample.

4. Discussion

Intense traffic over agricultural fields usually lead to soil surface compaction, increasing bulk density, which has also been observed by other authors (Teferi *et al.*, 2016; Stoessel *et al.*, 2018; Botta *et al.*, 2020). Forested areas typically exhibit a heterogeneous mix of plant species in the 0-20 cm layer, resulting in various types and sizes of roots that enhance soil aeration, foster edaphic fauna, and increase organic material content in this layer (Li *et al.*, 2021). The higher mean Mac of soils under forest compared to other land uses is consistent with results reported by Sekucia *et al.* (2020). In areas of annual crops and pasture, Mac means were not statistically different according to Tukey's test (Table 3 and Figure 2), possibly due to soil compaction from agricultural machinery and animal trampling (Wang *et al.*, 2017; Shah *et al.*, 2017). This soil type typically maintains a macropore to micropore ratio close to 3:2, and regions with low Mac values are more compacted, resulting in a ratio closer to 1:1.

Land management practices directly influenced $\text{Log}10K_{sat}$ data, which are more dependent on soil structure than texture and can vary considerably in the field (Zhang and Schaap, 2019; Usowicz and Lipiec, 2021). Soil structure heterogeneity can be associated with water drainage behavior, as reported by Turek *et al.* (2021), who found similar soil hydraulic behavior in their study. Dos Santos *et al.* (2021) observed in ECW, that soils under native vegetation generally had smaller BD, higher K_{sat} , and Mac compared to soils affected by agricultural cultivation (Table 3 and Figure 2).

The absence of common soil conservation practices in areas where annual soil use predominated, particularly in tobacco cultivation areas within the same watershed (ECW), increases soil vulnerability to degradation. This leads to reduced soil health and increased erosion risk, exacerbated by intensive topsoil layer (0-20 cm) use by farmers.

The OC content is an important indicator of soil fertility in the tropics and influences crop response to mineral fertilizers (Musinguzi *et al.*, 2016). The lack of statistical difference in OC mean results across different land uses in this watershed may be due to natural manure addition in pastures and anthropogenic manure addition in annual crops, similar results are observed by Tesfahunegn & Gebru (2020) and Lei *et al.* (2021).

Similar results for θ_{s-pF} , θ_{fc-pF} , and θ_{pwp-pF} (Table 4 and Figure 3) were also identified by Kiani *et al.* (2017). There was little variation in θ_{s-pF} data (Table 4), this result is related with the sandy texture under all land uses, which provides more macroporosity that contributes to a more uniform soil saturation distribution. The low mean values of θ_{s-pF} and θ_{fc-pF} under pasture are consistent with the findings of Kelishadi *et al.* (2014), who reported similar behavior in a soil with low hydraulic conductivity due to high compaction. The uniformity in θ_{s-pF} data can be attributed to the sandy texture under all land uses, which provides more macroporosity and a more consistent soil saturation distribution.

Bacher *et al.* (2022) reported that, on average, 85% of the integral energy was used for storing water in the PAWC range over time in an Irish soil, dominating the aeration process regardless of soil management and use. The distribution of hydraulic energy in this study, particularly the allocation of about 80% of energy to water retention and 20% to soil aeration in native forest and pasture soils, reveals significant aspects of soil physical health.

The data reflecting soil preparation processes for planting, which caused high BD values in some regions with a larger concentration of micropores, are consistent with findings by Ferro *et al.* (2014), Xing *et al.* (2018), and Li *et al.* (2021). The PAWC results being $\geq 20\%$ are considered a great range by Reynolds *et al.* (2009) for Canadian soils. The *DP* result for these soils was also high, which was considered great ($\geq 14\%$) by Reynolds *et al.* (2009) for Canadian soils.

The high mean WR_{a-pF} in soil under silviculture might be associated with the *Eucalyptus* spp., which has a uniform distribution of root types and sizes that contribute to enhanced soil aeration. This is reflected in the adequate *DP* result, supported by the presence of edaphic fauna and the amount of organic matter in the 0-20 cm layer. The low mean WR_{a-pF} and high mean AW_{r-pF} in pasture soils indicate a balance in the hydraulic energy used for aeration and water retention processes. Bacher *et al.* (2019) reported the success of using AW_r as an indicator to examine soil compaction, especially when BD was altered by machinery or grazing animal traffic.

The statistical difference in *PAWC* observed only in pasture soils highlights the importance of soil structure. The *DP* data's link to soil aeration status, confirmed by differences in A_{a-pF} , A_{r-pF} , and AW_{r-pF} , emphasizes the role of these indicators in understanding soil physical health. The effect of BD differences on hydraulic behavior, effectively captured by WR_{r-pF} , underscores the relevance of this hydraulic-energy indicator.

The BSPHI results were sensitive for capturing small alterations in soil structure (Table 7). This blanket index showed up as promising tool to support finer soil physical structure examination as long as SWRCs are built using large and medium soil samples by applying conventional analysis (Reynolds *et al.*, 2009; Armindo and Wendroth, 2016) or small samples by using micromorphological (dos Reis *et al.*, 2019; dos Reis *et al.*,

2021), micro-computed tomography or X-ray (Zhao et al., 2021; Wen et al., 2023) analyses. The influence of different land uses on the results of BD, DP , $PAWC$, A_{a-pF} and WR_{a-pF} was noticed. The analysis associating this group of variables was more succeeded than the uniqueness of an isolated variable. As an example, a region with higher BD can exhibit other characteristics beyond soil density that are connected to the other analyzed SPQ indices, resulting in a range of excellent physical health (Table 1). Similarly, a soil sample can be considered as "unhealthy" or "very unhealthy" of SPQ despite having BD values deemed "optimal," due to imbalances in the other indices, as observed in the examples of native forest and silviculture (Table 7).

5. Conclusions

The Ellert Creek Watershed (ECW) soils exhibited varying levels of bulk density (BD), total porosity (TP), macroporosity (Mac), saturated hydraulic conductivity (K_{sat}), field capacity (θ_{fc}), drainable porosity (DP), plant-available water ($PAWC$), absolute and relative energy indices of aeration, and relative energy indices of water retention and air-water balance. Differences in soil physical health (SPH) were attributed to natural shrink-swell cycles, native fauna activity (in native forest areas), and the specific uses and management practices in other areas. However, the SPH changes were not identified when microporosity (Mic) and organic carbon (OC) content were analyzed. Although the primary physical properties (BD and TP) have already shown SPH differentiation, a more complete and refined analysis was possible when differences in the hydraulic-energy indices was evidenced. All land uses provided adequate $PAWC$ for the growth and development of plants, however, only lands under native forest and silviculture provided high levels of DP for soil aeration due to their root system. Although the site under annual crops plays an important economic role for human activities in this watershed, it showed a higher unbalance between energies of soil aeration and water retention than the other

sites due to its higher BD and smaller TP levels resulted from the machinery traffic and tillage practices. To address the complexity of the SPH analysis, a comprehensive index was developed by combining sand and clay, BD, *PAWC*, *DP* and two hydraulic-energy-indices were combined in a formulation to derive a unique and blanked SPH index to scale the soil structure analysis in the ECW. The BSPHI index effectively identified locations within the ECW with significant edaphic vulnerability. This newly developed index can be applied in other studies to assess SPH, nevertheless it is appropriate to establish threshold ranges for different soil types under various crops, climates, and uses before their application.

6. Acknowledgments

This study was partially financed by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

7. References

- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L. de M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift*, 22(6), 711-728.
<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Armindo, R.A., & Wendroth, O. (2016). Physical soil structure evaluation based on hydraulic energy functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 80(5), 1167-1180.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2016.03.0058>
- Armindo, R.A., & Wendroth, O. (2019). Alternative approach to calculate soil hydraulic-energy-indices and -functions. *Geoderma*, 355, 1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113903>

475

476 Bacher, M.G., Schmidt, O., Bondi, G., Creamer, R., & Fenton, O. (2019). Comparison of
477 soil physical quality indicators using direct and indirect data inputs derived from a
478 combination of in-situ and ex-situ methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 83(1), 5-17.
479 <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.06.0218>

480

481 Bacher, M.G., Armindo, R.A., Schmidt, O., Bondi, G., & Fenton, O. (2022). Testing
482 numeric and logarithmic scales for hydraulic-energy indices and functions to assess
483 physical earthworm effects on soil structure. *Geoderma Regional*, 28.
484 <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00466>

485

486 Beskow, S., Timm, L.C., Tavares, V.E.Q., Caldeira, T.L., Aquino, L.S. (2016). Potential
487 of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: A case study
488 of the Fragata River basin, Southern Brazil. *Hydrological Sciences Journal*. 61, 2567-
489 2578. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1133912>

490

491 Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986). Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil*
492 *Analysis, Part 1—Physical and Mineralogical Methods* (2nd ed.), Agronomy Monograph
493 9, American Society of Agronomy—Soil Science Society of America, Madison, pp. 363-
494 382.

495

496 Botta, G.F., Antille, D.L., Bienvenido, F., Rivero, D., Avila-Pedraza, E.A., Contessotto,
497 E.E., Ghelfi, D.G., Nistal, A.I., Pelizzari, F.M., & Rocha-Meneses, L. (2020). Effect of
498 cattle trampling and farm machinery traffic on soil compaction of an Entic Haplustoll in

499 a semiarid region of Argentina. *Agron. Res.*, 18(2), 1163-1176.
 500 <https://doi.org/10.15159/AR.20.063>
 501
 502 Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., Deyn, G. de, Goede, R. de,
 503 Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., & Mäder, P. (2018). Soil quality – A critical
 504 review. *Soil Biol. Biochem.*, 120, 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
 505
 506 Clunes, J., Valle, S., Dörner, J., Martínez, O., Pinochet, D., Zúñiga, F., & Blum, W.
 507 (2022). Soil fragility: a concept to ensure a sustainable use of soils. *Ecol. Indic.*, 139.
 508 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108969>
 509
 510 Dai, C., Liu, Y., Wang, T., Li, Z., Zhou, Y., & Deng, J. (2022). Quantifying the structural
 511 characteristics and hydraulic properties of shallow Entisol in a hilly landscape. *Int.*
 512 *Agrophys.*, 36(2), 105-113. <https://doi.org/10.31545/intagr/148029>
 513
 514 Di Prima, S., Castellini, M., Pirastru, M., & Keesstra, S. (2018). Soil water conservation:
 515 dynamics and impact. *Water*, 10(7), 952. <https://doi.org/10.3390/w10070952>
 516
 517 Dos Reis, A.M.H., Armindo, R.A., & Pires, L.F. (2019). Physical assessment of a
 518 Haplohumox soil under integrated crop-livestock system. *Soil Tillage Res.*, 194, 104294.
 519 <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104294>
 520
 521 Dos Reis, A.M.H., Auler, A.C., Armindo, R.A., Cooper, M., Pires, L.F.
 522 (2021). Micromorphological analysis of soil porosity under integrated crop-livestock
 523 management systems. *Soil Tillage Res.*, 205(), 104783–. doi:10.1016/j.still.2020.104783

524

525 Dos Santos, R.C.V., Soares, M.F., Timm, L.C., Siqueira, T.M., Mello, C.R., & Beskow,
526 S. (2021). Spatial uncertainty analysis of the saturated soil hydraulic conductivity in a
527 subtropical watershed. *Environ. Earth Sci.*, 80, 707. [https://doi.org/10.1007/s12665-021-](https://doi.org/10.1007/s12665-021-10017-w)
528 10017-w

529

530 Ferro, N.D., Sartori, L., Simonetti, G., Berti, A., & Morari, F. (2014). Soil macro- and
531 microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root
532 growth. *Soil Tillage Res.*, 140, 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.02.003>

533

534 Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M.,
535 ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337–342.
536 <https://doi.org/10.1038/nature10452>

537

538 Fuentes-Guevara, M.D., Armino, R.A., Timm, L.C., & Faria, L.C. (2022). Examining
539 the land leveling impacts on the physical quality of lowland soils in Southern Brazil. *Soil*
540 *Tillage Res.*, 215, 105217. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105217>

541

542 Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of*
543 *Soil Analysis*, 9, Part 1, Agronomy Monograph (2nd ed.), ASA-SSSA, Madison, pp. 383-
544 411.

545

546 Kelishadi, H., Mosaddeghi, M.R., Hajabbasi, M.A., & Ayoubi, S. (2014). Near-saturated
547 soil hydraulic properties as influenced by land use management systems in Koohrang

region of central Zagros, Iran. *Geoderma*, 213, 426-434.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.008>

Kiani, M., Hernandez-Ramirez, G., Quideau, S., Smith, E., Janzen, H., & Larney, F.J. (2017). Quantifying sensitive soil quality indicators across contrasting long-term land management systems: crop rotations and nutrient regimes. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 248, 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.032>

Kibblewhite, M., Ritz, K., & Swift, M. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 685–701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>

Lei, L., Thompson, J. A., & McDonald, L. M. (2021). Soil Organic Carbon Pools and Indices in Surface Soil: Comparing a Cropland, Pasture, and Forest Soil in the Central Appalachian Region, West Virginia, U.S.A. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1–13. doi:10.1080/00103624.2021.1956524

Li, H., Yao, Y., Zhang, X., Zhu, H., & Wei, X. (2021). Changes in soil physical and hydraulic properties following the conversion of forest to cropland in the black soil region of Northeast China. *Catena*, 198, 104986. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104986>

Mamedov, A., Ekberli, I., Gülser, C., Gümüş, I., Çetin, U., & Levy, G.J.G. (2016). Relationship between soil water retention model parameters and structure stability. *Eurasian J. Soil Sci.*, 5(4), 314-321. <https://doi.org/10.18393/ejss.2016.4.314-321>

Minasny, B., & McBratney, A.B. (2003). Integral energy as a measure of soil-water availability. *Plant and Soil*, 249, 253–262. <https://doi.org/10.1023/A:1022825732324>

Muñoz-Rojas, M., Jordán, A., Zavala, L.M., De la Rosa, D., Abd-Elmabod, S.K., & Anaya-Romero, M. (2012). Organic carbon stocks in Mediterranean soil types under different land uses (Southern Spain). *Solid Earth*, 3, 375–386. <https://doi.org/10.5194/se-3-375-2012>

Musinguzi, P., Ebanyat, P., Tenywa, J.S., Basamba, T.A., Tenywa, M.M., & Mubiru, D.N. (2016). Critical soil organic carbon range for optimal crop response to mineral fertiliser nitrogen on a ferralsol. *Experimental Agriculture*, 52(4), 635-653. <https://doi.org/10.1017/s0014479715000307>

Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1982). Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2*, 2nd ed. Agronomy Monograph vol. 9. ASA-SSSA, Madison, WI, pp. 534–580.

Prevedello, C.L. (1999). New method for estimating soil water content at field capacity condition. *Braz. J. Water Res.*, 4, 23–28. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v4n3.p23-28>

Pulido-Moncada, M., Gabriels, D., & Cornelis, W.M. (2014). Data-driven analysis of soil quality indicators using limited data. *Geoderma*, 235-236, 271-278. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.014>

Pulido-Moncada, M., Ball, B.C., Gabriels, D., Lobo, D., & Cornelis, W.M. (2014). Evaluation of Soil Physical Quality Index S for Some Tropical and Temperate Medium-Textured Soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 79(1), 9-19. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.06.0259>

R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Available at: <https://www.R-project.org>

Rab, M.A., Nasta, P., Armino, R.A., Beverly, C.R., Reynolds, W.D., & Romano, N. (2023). Empirical equations for estimating field capacity in dryland cropping soils of southeastern Australia. Soil & Tillage Research, 234, 105816.

Razali, N.M., & Wah, Y.B. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors, and Anderson-Darling tests. Journal of Statistical and Analytics, 2(1), 21-33.

Reichert, J.M., Reinert, D.J., & Braid, J.A. (2003). Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. Ciência & Ambiente, 27(1), 29-48.

Reichert, J.M., Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.J., Horn, R., & Håkansson, I. (2009). Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. Soil and Tillage Research, 102(2), 242–254. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>

- Reinert, D.J., Albuquerque, J.A., Reichert, J.M., Aita, C., & Andrada, M.M.C. (2008).
 Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura
 em argissolo vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(5), 1805-1816.
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>
- Reynolds, W.D., Bowman, B.T., Drury, C.F., Tan, C.S., & Lu, X. (2002). Indicators of
 good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110(1-2), 131-146.
[https://doi.org/10.1016/s0016-7061\(02\)00228-8](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(02)00228-8)
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., & Yang, X.M. (2009). Use of
 indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality.
Geoderma, 152(3-4), 252-263. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>
- Santos, G.A. dos, Dias Junior, M. de S., Guimarães, P.T.G., & Furtini Neto, A.E. (2005).
 Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento
 de plantas de milho (zea mays l.) cultivadas em solos distintos. *Ciência e Agrotecnologia*,
 29(4), 740-752. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542005000400005>
- Sekucia, F., Dlapa, P., Kollár, J., Cerdá, A., Hrabovský, A., & Svobodová, L. (2020).
 Land-use impact on porosity and water retention of soils rich in rock fragments. *Catena*,
 195, 104807. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104807>
- Shah, A.N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Ali, S., Bukhari, M.A., Tung,
 S.A., Hafeez, A., & Souliyanonh, B. (2017). Soil compaction effects on soil health and

crop productivity: an overview. Environ. Science Pollut. Research, 24(11), 10056-10067.

<https://doi.org/10.1007/s11356-017-8421-y>

Soares, M.F., Centeno, L.N., Timm, L.C., Mello, C.R., Kaiser, D.R., & Beskow, S. (2020). Identifying Covariates to Assess the Spatial Variability of Saturated Soil Hydraulic Conductivity Using Robust Cokriging at the Watershed Scale. J. Soil Sci. Plant Nutr., 20(3), 1491-1502. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00228-8>

Soil Survey Staff. (2022). Keys to Soil Taxonomy, 13th edition. USDA-Natural Resources Conservation Service.

Stoessel, F., Sonderegger, T., Bayer, P., & Hellweg, S. (2018). Assessing the environmental impacts of soil compaction in Life Cycle Assessment. Sci. Total Environ., 630, 913-921. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.222>.

Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.J., Alves, M.C., & Reichert, J.M. (2022). Critical Limits for Soybean and Black Bean Root Growth, Based on Macroporosity and Penetrability, for Soils with Distinct Texture and Management Systems. Sustainability, 14(5), 2958. <https://doi.org/10.3390/su14052958>

Teferi, E., Bewket, W., & Simane, B. (2016). Effects of land use and land cover on selected soil quality indicators in the headwater area of the Blue Nile basin of Ethiopia. Environ. Monit. Assess., 188(2), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5086-1>

Tesfahunegn, G. B., & Gebru, T. A. (2020). Variation in soil properties under different cropping and other land-use systems in Dura catchment, Northern Ethiopia. PLOS ONE, 15(2), e0222476. doi:10.1371/journal.pone.0222476

Turek, M.E., Armindo, R.A., & Wendroth, O. (2019). Criteria for the estimation of field capacity and their implications for the bucket type model. Eur. J. Soil Sci., 70(2), 278-290. <https://doi.org/10.1111/ejss.12747>

Turek, M.E., Armindo, R.A., & Wendroth, O. (2021). Hydraulic energy indices reveal spatial dependence in a subtropical soil under maize crop in Southern Brazil. Pedosphere, 31(5), 771-782. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(20\)60093-5](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(20)60093-5)

Usowicz, B., & Lipiec, J. (2021). Spatial variability of saturated hydraulic conductivity and its links with other soil properties at the regional scale. Scientific Reports, 11(1), 82-93. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86862-3>

Van Genuchten, M.TH. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44(5), 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

Várallyay, G. (2007). Soil resilience (is soil a renewable natural resource?). Cereal Res. Commun., 35(2), 1277–1280. <https://doi.org/10.1556/CRC.35.2007.2.278>

Veihmeyer, F.J., & Hendrickson, A.H. (1948). Soil density and root penetration. Soil Science, 65(6), 487-494.

Wang, P., Hu, Z., Zhao, Y., & Li, X. (2016). Experimental study of soil compaction effects on GPR signals. *J. Appl. Geophy.*, 126, 128-137.

<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.01.019>

Wen, T., Chen, X., Luo, Y., Shao, L. and Niu, G. (2023). Three-dimensional pore structure characteristics of granite residual soil and their relationship with hydraulic properties under different particle gradation by X-ray computed tomography. *Journal of Hydrology*, 618, pp.129230–129230. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129230>.

Xing, X., Li, Y., & Ma, X. (2018). Water retention curve correction using changes in bulk density during data collection. *J. Eng. Geol.*, 233, 231-237.

<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.12.018>

Zhang, Y., & Schaap, M.G. (2019). Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: a review. *J. Hydrol.*, 575, 1011-1030.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.058>

Zhao, Y., Sun X., Wen, T., Chen. R., Huang, L. (2021). Micro-structural Evolution of Granite Residual Soil under External Loading Based on X-ray Micro-computed Tomography. *KSCE Journal of Civil Engineering*, (), -. doi:10.1007/s12205-021-0803-

5

6. Artigo 2

Hierarchical analysis of soil physical quality by means of water retention and flux

Angelo Garcia Costa^{1*}, Mauricio Fornalski Soares², Miguel Fuentes Guevara³, Rômulo Félix Nunes⁴, Danni Maisa da Silva⁵, Robson André Armindo⁶ Luis Carlos Timm⁷.

¹Soil and Water Conservation and Management Graduate Program, Federal University of Pelotas, Capão do Leão, RS CEP: 96010-610, Brazil. costagarciaangelo@gmail.com

*Corresponding Author

²Department of Phytotechnics, Rural Sciences Center, Federal University of Santa Maria (UFSM), Santa Maria (RS), CEP: 97105-900, Brazil. mauriciofornalski@gmail.com

³Araucária Foundation – Unicentro, Cedeteg Campus, Agronomy Graduate Program, Guarapuava, PR, CEP: 85040-167, Brazil. miguelfuge@hotmail.com

⁴Soil and Water Conservation and Management Graduate Program, Federal University of Pelotas, Capão do Leão, RS CEP: 96010-610, Brazil. nunes.romulo@outlook.com

⁵State University of Rio Grande do Sul (UERGS), Três Passos, RS CEP: 98600-000, Brazil. danni-silva@uergs.edu.br

⁶Department of Physics (DFI), Institute of Natural Sciences (ICN), Federal University of Lavras (UFLA), Mailbox 3037, CEP: 37200-900, Lavras (MG), Brazil. robson.armindo@ufla.br.

⁷Department of Rural Engineering/Eliseu Maciel Agronomy College, Federal University of Pelotas, Capão do Leão, RS CEP: 96160-000, Brazil. lctimm@ufpel.edu.br

Abstract

The soil structure has been the main aim of investigation in studies of land use and management examination in watersheds. Thus, the soil structure is usually examined by various soil physical quality (SPQ) indices, which are easily calculated with properties measured in soil specimens already sampled in surveys. This study aimed to examine a hierarchical SPQ analysis of a watershed in south Brazil performed with indices following from the simplest to the more complex index to let the examination finer. The SPQ indices were divided into six groups: 1 - bulk density (BD), total porosity (TP), macroporosity (Mac), microporosity (Mic), organic carbon (OC), 2 - saturated hydraulic conductivity (K_{sat}), 3 - drainable porosity (DP) and plant available water content ($PAWC$), 4 - hydraulic-energy indices derived from the soil water retention curve (A_{a-pF} , A_{r-pF} , WR_{a-pF} , WR_{r-pF} , and AW_{r-pF}), 5 – the ratios A_{a-pF}/DP and $WR_{a-pF}/PAWC$, and 6 - matric flux indices (MF_{Aa} , MF_{Ar} , MF_{WRa} , MF_{WRr} , and MF_{AWr}) derived from the unsaturated hydraulic conductivity curve. An exploratory analysis of all examined SPQ indices was carried out using measures of central tendency (minimum, maximum, and mean), dispersion (standard deviation, coefficient of variation, kurtosis, and skewness) and the Shapiro-Wilk normality test. The correlations between each group of study following the hierarchical order was carried out by the Spearman correlation's coefficient. The hierarchical SPQ analysis was efficient in compiling and scheduling the most easily-used-key SPQ indices to systematically analyze the processes of soil aeration and water retention and flows to assist both researchers and farmers of the watershed in decision-making situations.

Keywords: Water retention, hydraulic conductivity, integral energy, soil physical health, Soil physical properties.

1. Introduction

In soil science, numerous studies have proposed and tested different soil physical quality (SPQ) indices, because since long time ago our knowledge of soil is based primarily on quantitative analysis of isolated physicochemical and biological properties (Granatstein & Bezdicek, 1992).

SPQ indices are tools to support farmers and decision-makers in adopting management protocols that preserve or enhance soil processes (Marion *et al.*, 2022). Soil quality is defined as the soil's capacity to function as a vital living system within the ecosystem and across various land uses, sustaining biological productivity, maintaining air and water quality, and promoting plant, animal, and human health (Karlen *et al.*, 2003, Bunneman *et al.*, 2018). Within this scope, SPQ can be examined by taking the advantage of the knowledge of physical properties to reflect and comprehend the soil quality. Although soil quality is not a single property and due to it may not be directly measured, it can be inferred by measuring various indicators, which depend on the scale and main objectives of the research.

Several properties have been used to infer SPQ, such as macroporosity - *Mac* (Reynolds *et al.*, 2002; Pulido-Moncada *et al.*, 2014; Timm *et al.*, 2020), bulk density - *BD* (Reynolds *et al.*, 2002; Timm *et al.*, 2020), drainable porosity - *DP* (Reynolds *et al.*, 2009; Armindo and Wendroth, 2016; Bacher *et al.*, 2022), plant available water capacity - *PAWC* (Reynolds *et al.*, 2009; Armindo and Wendroth, 2019; Timm *et al.*, 2020), saturated hydraulic conductivity - K_{sat} (Drewry and Paton, 2005; Yu *et al.*, 2015; Turek *et al.*, 2018) and organic carbon - *OC* (Reynolds *et al.*, 2009).

The hydraulic conductivity ($K(h)$) is one of the most important functions used to describe an unsaturated soil behavior by modeling the water and air flows and the soil consolidation. Beyond the water pressure head, this function also depends on the soil

structure (Daneshian *et al.*, 2021). However, its complete measure is not made with instruments of user-friendly and cheap apparatus by its estimation by compiling K_{sat} and SWRC parameters is quite common. Among the most common models to address the $K(h)$ function, those based on the fitted parameters of the van Genuchten (1980)-Mualem (vGM) equation are the most used.

The Matric Flux (MF) stands out as a crucial soil hydraulic-energy property, mainly in investigations concerning water movement, especially in scenarios devoid of horizontal flow or encompassing short-distance movements, such as water extraction by plant roots from the soil (De Jong Van Lier *et al.*, 2008; Pinheiro *et al.*, 2019; de Melo *et al.*, 2023). The MF function is strongly related to soil structure condition, *i.e.*, SPQ, because it encapsulates hydraulic conductivity integrated over pressure head and is associated with the soil water diffusivity (De Jong Van Lier *et al.*, 2008, Grant and Groenevelt, 2015). Both hydraulic functions are ascertainable through field and laboratory experiments utilizing direct methods of measurement or inverse modeling techniques (Pinheiro *et al.*, 2019).

Hence, this study aimed to examine a hierarchical SPQ analysis structured based on easy-to-measure properties and functions prioritizing the physical health status of the soil by means of examining the soil aeration and water retention processes.

2. Material and Methods

4.1. Experimental area

This research was conducted within the Ellert Creek watershed (ECW), which serves as a headwater catchment for the Pelotas River Watershed (PRW). The ECW is situated near to the city of Canguçu, in the southern region of Rio Grande do Sul, Brazil (Figure 1). This experimental area is the field catchment area of an umbrella project that

aims to provide a hydrological modeling for ECW. For it, the data set already published in the papers of Soares *et al.* (2020) and Dos Santos *et al.* (2021) were reorganized and used to perform the SPQ analysis of the ECW lands in this current study.

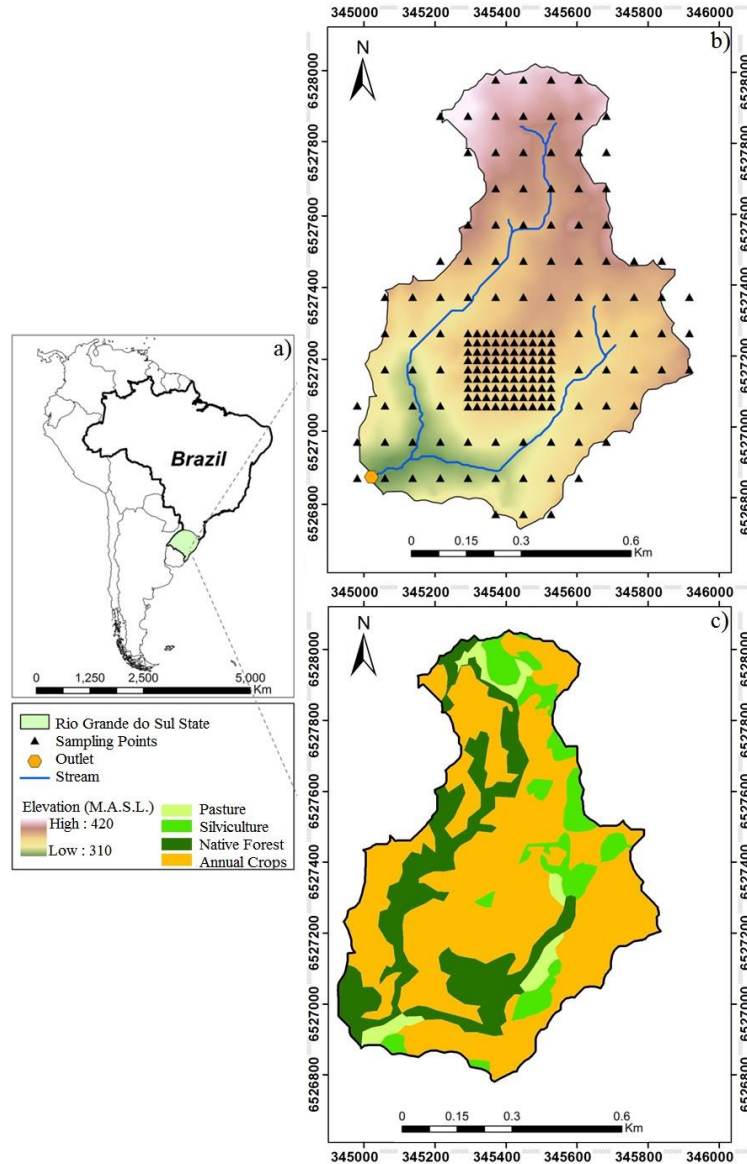


Figure 1 – Location (a), topography, hydrography, sampling points (b) and main soil use types (c) in the Ellert Creek Watershed.

According to Köppen’s classification, the regional climate over the ECW area is classified as Cfa type, representing a subtropical environment with sea influences, sub-humid summers and humid or super-humid conditions in the remaining seasons. The

annual mean temperature and precipitation are of 18°C and 1,350 mm, respectively, with precipitation well distributed throughout the year (Alvares *et al.*, 2013). The regional relief shows the predominance of shallow soils varying from undulating to strong undulating in the ECW. The watershed has an area of 0.66 km² and altitude elevation ranging from 310.9 to 419.4 m. Based on USDA Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2022), the soil in the EWC lands is classified as Entisols, which are shallow soils located over rocky outcrops. Four different types of land use (Figure 1c) were identified in the ECW area: The annual crop land use included many types of crops, such as *Glycine max* and *Zea mays*, and occupied 59% of the ECW area, indicating an intensive anthropic soil management practice by farmers. Forest includes native forest sites which accounted for about 17% of the ECW's area; areas of silviculture, planted with *Pinus* sp., *Eucalyptus* sp., and *Acacia* sp., were equivalent to 14% of the ECW area. Pasture areas accounted for 10% of the total area. The demarcation of each point-location in the ECW area was done by using a GPS navigation equipment.

4.2. Sampling and soil physical properties

The sampling grid (Figure 1b) was defined with points spaced 50 m apart in the west direction and 75 m apart in the south direction (50 m x 75 m), totaling 106 points during the initial campaign. To better capture the spatial variation of soil physical properties at smaller distances, a second campaign in the central watershed collected an additional 78 points, spaced by 25 m x 25 m, totaling 184 points (Figure 1b). From these 184 samples, 20 were discarded in the laboratory as unsuitable to be analyzed.

The annual crop land use comprised various types of crops (*Glycine max*, *Zea mays* and *Nicotiana tabacum*) occupied approximately 59% of the ECW area, indicating extensive human-driven soil management practices by farmers. The forested areas

consisted of native forest sites, covering approximately 17% of the ECW's total area. Silviculture areas, planted with *Pinus sp.*, *Eucalyptus sp.*, and *Acacia sp.*, accounted for 14% of the ECW watershed area. Pasture areas covered 10% of the total area (Figure 1c).

At each sampling point, disturbed soil material was sampled from the 0-20 cm soil layer to determine the organic carbon (OC) content by the Walkley-Black method (Nelson and Sommers, 1982). Additionally, the textural fractions of sand (using the Sieving method), silt, and clay were determined using the Pipette method (Gee and Bauder, 1986). At the same points and same soil layer, undisturbed samples were taken using volumetric rings with 5-cm-diameter and 3-cm-height to calculate bulk density (BD) (Blake and Hartge, 1986), total porosity (TP), macroporosity (Mac), microporosity (Mic), and soil water retention curves (SWRCs) (volumetric soil water contents (θ) measured at absolute matric potentials (h), hereafter declared as pressure head, of 0, 10, 60, 100, 330, 1000 and 15000 cm) (Klute, 1986). The soil water content measured at -60 cm [$\theta(60\text{ cm})$] was declared as microporosity and the difference between saturation [$\theta(0)$] and $\theta(60\text{ cm})$ was taken as macroporosity (Mac).

4.3. Fitting SWRCs and calculating the hydraulic-energy indices

Each experimental SWRC was fitted to the mathematical model of the van Genuchten (1980) (vGM), written in pF scale, $pF = \log_{10}(h)$ (Armino and Wendroth, 2019; Bacher *et al.*, 2022; Fuentes-Guevara *et al.*, 2022) as follows

$$\theta(pF) = \theta_{r-pF} + \frac{\theta_{s-pF} - \theta_{r-pF}}{\left[1 + (\alpha_{pF} \cdot pF)^{n_{pF}}\right]^{1-1/n_{pF}}} \quad (1)$$

in which $\theta(pF)$ is the soil water content as a function of the pressure head in pF scale, θ_{s-pF} is the saturated water content, θ_{r-pF} is the residual water content, and α_{pF} and n_{pF} are fitting parameters.

884 According to Armindo and Wendroth (2019), the absolute soil aeration energy
 885 (A_{a-pF}) and the absolute soil water retention energy (WR_{a-pF}) are equated by:

$$A_{a-pF} = \int_{\theta_{fc-pF}}^{\theta_{s-pF}} pF(\theta) d\theta \quad (2)$$

$$WR_{a-pF} = \int_{\theta_{pwp-pF}}^{\theta_{fc-pF}} pF(\theta) d\theta \quad (3)$$

886 in which A_{a-pF} and WR_{a-pF} are the absolute hydraulic-energy indices of aeration and water
 887 retention, respectively. θ_{s-pF} , θ_{fc-pF} , and θ_{pwp-pF} are the limits of integration and,
 888 respectively denote the volumetric soil water content at saturation, field capacity, and
 889 permanent wilting point. θ_{s-pF} is a fitting parameter from eq.(1), θ_{fc-pF} is obtained by the
 890 dynamic criterion that establishes a negligible flux drainage through the time
 891 $[(d\theta/dt \rightarrow 0)]$ (See Prevedello, 1999; Armindo and Wendroth, 2016; Turek *et al.*, 2018;
 892 and Rab *et al.*, 2023 for more details), and θ_{pwp-pF} is set as the water content at 15,000 cm-
 893 pressure head.

894 Following Armindo and Wendroth (2019) and Bacher *et al.* (2021), these limits
 895 of integration were also used to calculate essential SPQ indices, such as the plant available
 896 water content (PAWC) and drainable porosity (DP), declared as

$$PAWC = \theta_{fc-pF} - \theta_{pwp-pF} \quad (4)$$

$$DP = \theta_{s-pF} - \theta_{fc-pF} \quad (5)$$

897

898 After that, the relative hydraulic-energy indices of aeration (A_{r-pF}), water retention
 899 (WR_{r-pF}), and air-water (AW_{r-pF}), which also are related to soil structure and SPQ status,
 900 were then quantified by

$$A_{r-pF} = 100[A_{a-pF} / (A_{a-pF} + WR_{a-pF})] \quad (6)$$

$$WR_{r-pF} = 100[WR_{a-pF} / (A_{a-pF} + WR_{a-pF})] \quad (7)$$

$$AW_{r-pF} = 100(A_{a-pF} / WR_{a-pF}) \quad (8)$$

901

902 The $K(h)$ was addressed by using the van Genuchten (1980) model to describe the
 903 relationship between the soil hydraulic conductivity (K) and the pressure head (h) under
 904 unsaturated conditions. For the data set of the ECW lands, the tortuosity factor (λ) of 0.5
 905 was employed, as suggested by Mualem and Friedman (1991) for soils with sand and
 906 loam textures.

$$K(h) = K_{sat} \left(1 + (\alpha h)^n \right)^{-m\lambda} \left(1 - \frac{(\alpha h)^{n-1}}{(1 + (\alpha h)^n)^m} \right)^2 \quad (9)$$

907 in which, $K(h)$ is the soil hydraulic conductivity as a function of the pressure head (h),
 908 K_{sat} is the hydraulic conductivity at saturation condition, α , n , and m are fitting parameters.

909

910 Then, the matric flux (MF) was quantified by the integral of the hydraulic
 911 conductivity $K(h)$ over the pressure head h

$$MF = \int_{h_{ref}}^h K(h) dh \quad (10)$$

912 in which, h_{ref} represents a reference potential, chosen arbitrarily, and h the final pressure
 913 head. In this work, two ranges for MF were established setting $h_{ref} = h_{fc}$ and 15000 cm and
 914 $h=0$ and h_{fc} , as follows

$$MF_{Aa} = \int_{h_{fc}}^0 K(h) dh \quad (11)$$

$$MF_{WRa} = \int_{15000}^{h_{fc}} K(h) dh \quad (12)$$

in which MF_{Aa} and MF_{WRa} are the matric flux absolute hydraulic-energy indices of aeration and water retention, respectively. 0, h_{fc} and 15000 are the limits of integration and, respectively denote the pressure head potential at saturation, field capacity and permanent wilting point.

After that, the matric flux potential ranges relative to the hydraulic-energy indices of aeration (MF_{Ar}), water retention (MF_{WRr}), and air-water (MF_{AWr}), which also are also related to soil structure and therefore used to support the SPQ examination, were then quantified by

$$MF_{Ar} = 100[MF_{Aa} / (MF_{Aa} + MF_{WRa})] \quad (13)$$

$$MF_{WRr} = 100[MF_{WRa} / (MF_{Aa} + MF_{WRa})] \quad (14)$$

$$MF_{AWr} = 100(MF_{Aa} / MF_{WRa}) \quad (15)$$

4.4. Hierarchical Flowchart to SPQ examination

A hierarchical flowchart (Figure 2) was used to analyze the sensitivity of the following SPQ indices of investigation across the several land use types performed in the ECW:

1. *BD*, *TP*, *Mac*, *Mic*, and *OC*: preliminary indices to infer about the soil structure capability of providing aeration, water retention and support to the development of crops.
2. K_{sat} : this index works out as a second parameter of investigation to assess the soil structure permeability to the water movement.
3. *DP* and *PAWC*: these hydraulic indices are important for assessing the soil's capability of to store and release water by the air-entrance within the structure of

pores. Moreover, they are fundamental properties to design and manage irrigation systems and soil conservation strategies.

4. Hydraulic energy indices (A_{a-pF} , A_{r-pF} , WR_{a-pF} , WR_{r-pF} and AW_{r-pF}): these indices offer comprehensive insights about the energy balance necessary to happen soil aeration and water retention and drainage processes.

5. The ratios A_{a-pF}/DP and $WR_{a-pF}/PAWC$: they are essential for analyzing in a finer way the soil aeration and available water for the plant uptake. These ratios show the equilibrium between the necessary energy per unit of drainable porosity and available water ranges.

6. Matric flux indices (MF_{Aa} , MF_{Ar} , MF_{WRa} , MF_{WRr} and MF_{AWr}): these indices offer detailed insights into the dynamics of soil water diffusivity and are associated with the soil water movement.

These SPQ indices allow a finer analysis of soil physical health, providing data information for a critical insight about the optimization of water and soil management practices. They were analyzed sequentially from the less complex to the more complex index. The granulometric fractions of sand, silt, and clay were not included in the hierarchical analysis because they are inherent properties of soil formation and exhibit minimal variation within the study area, which features a single soil type with similar textural fractions. Nevertheless, they were incorporated into the descriptive and correlational analyses due to their critical role in site characterization.

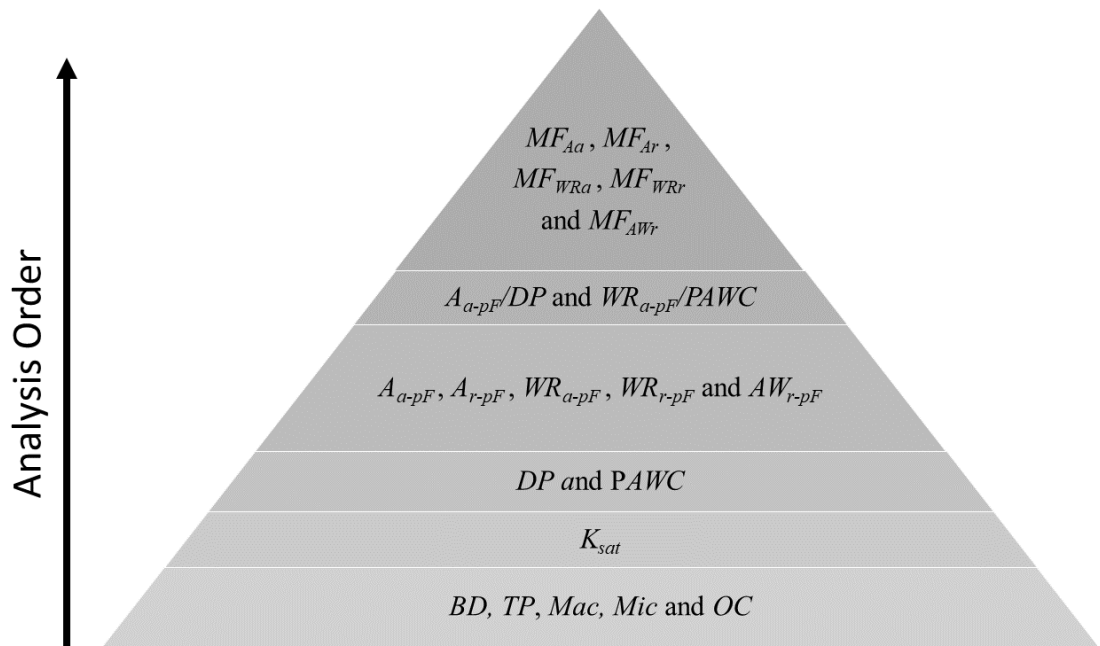


Figure 2 – Proposed Hierarchical Flowchart to SPQ examination

2.5 Statistical analysis

An exploratory analysis of all parameters was carried out by taking measures of central tendency (minimum, maximum and mean values), dispersion (standard deviation, coefficient of variation, kurtosis and skewness), Shapiro-Wilk normality test, and Spearman correlation to demonstrate the sensitivity of each SPQ indicator.

Linear correlations were examined between the SPQ indices located in the 1st level of the pyramid (BD , TP , Mac , Mic , and OC) according to the flowchart (Figure 2). Subsequently, the 2nd SPQ index-level of investigation (K_{sat}) was correlated with the SPQ indices from the pyramid' ground, followed by the indices from the 3rd level (DP and $PAWC$) with the indices from 1st and 2nd levels, and so 4th, until investigating the correlations between the energy indices from the 6th level (MF_{Aa} , MF_{WRa} , MF_{Ar} , MF_{WRr} and MF_{AWr}) with the indices from levels 1 to 5.

Ratner (2009) states that correlations with values between 0 and 0.3 (or 0 and -0.3) indicate a weak positive (or negative) linear relationship, characterized by a shaky linear rule. Values between 0.3 and 0.7 (or -0.3 and -0.7) suggest a moderate positive

(or negative) linear relationship. Values between 0.7 and 1.0 (or -0.7 and -1.0) indicate a strong positive (or negative) linear relationship and values of 1 or -1 indicate a perfect linear relationship (positive or negative), meaning that as one variable increases, the other variable increases or decreases according to an exact linear rule. Following Zang and Wang (2023), the Spearman rank correlation coefficient was applied because it is applicable for both normally and non-normally distributed data, effective in characterizing linear or nonlinear correlations, and is more robust and insensitive to outliers.

3. Results and Discussion

3.1 Exploratory analysis

Based on the data presented in Table 1, several key insights were taken regarding the soil physical properties across different land uses in the ECW. Firstly, the *BD* results found in the native forest areas were noticeably smaller in comparison with the results of areas under annual crops and pastures. This result can be attributed to the absence of soil compaction from agricultural machinery and livestock trampling in the soils under forests. The smaller *BD* found in forest areas (Native Forest and Silviculture) contributes to higher values of *Mac*, indicating a greater amount of large pores that facilitate better soil aeration and water infiltration. Conversely, soils under annual crops and pastures exhibited large *BD* results due to the increased soil density caused by agricultural traffic, such as machinery and livestock grazing. Despite the high *BD* results, some practices of conventional soil preparation often lead to larger *Mac* values in annual crop fields than in pasture lands (Basche and DeLonge, 2019). Native forests generally exhibit favorable values of basic soil physical properties, which are characterized by low *BD*, large *Mac* and *K_{sat}* values.

The differences in *OC* content among land uses were not significant, reflecting the manure application in agricultural fields as well as the natural inputs from animals in pastures. This found *OC* content across different land uses indicates ongoing management practices that maintain stable organic matter levels in the soil. Regarding the K_{sat} results, native forests and silviculture exhibited higher values in comparison with the ones found in the agricultural and pasture areas manifesting the effect of these management practices on the soil structure enhancing their permeability to the water movement. These great K_{sat} values found in forested soils suggest an appropriate soil structure with wide pore connectivity.

In summary, the results of the soil physical properties of the two ground steps of the hierarchical flowchart underscored the significant influence of land use on the soil structure, hydraulic permeability, and organic matter content in the ECW. These findings underscore the importance of sustainable land management practices that promote soil physical health, biodiversity conservation, and ecosystem resilience in agricultural landscapes.

1013 Table 1 - Soil physical properties according to samples collected in ECW with different land uses.

Annual crops							Native forest					
	<i>BD</i>	<i>TP</i>	<i>Mic</i>	<i>Mac</i>	<i>OC</i>	<i>K_{sat}</i>	<i>BD</i>	<i>TP</i>	<i>Mic</i>	<i>Mac</i>	<i>OC</i>	<i>K_{sat}</i>
Min	0.90	33.76	13.13	6.44	0.15	0.01	0.81	40.36	11.44	8.45	0.13	0.03
Max	1.76	66.10	31.11	44.01	2.22	3.76	1.58	69.54	36.77	46.69	2.66	3.46
Mean	1.45	45.28	20.38	24.90	1.08	0.73	1.23	53.58	21.59	31.99	1.10	1.38
S	0.14	5.14	4.18	7.00	0.47	0.75	9.51	6.26	6.26	8.99	0.65	0.95
CV	0.09	0.11	0.21	0.28	0.44	1.03	0.18	0.29	0.29	0.28	0.59	0.69
Kurt.	1.18	1.18	-0.58	-0.01	-1.05	2.52	0.28	0.85	0.85	-0.60	0.51	0.57
Skew.	-0.46	0.46	0.38	-0.44	-0.34	1.62	-1.29	0.32	0.32	1.03	-0.12	-0.52
S-W	0.98	0.98	0.97	0.97	0.92	0.82	0.92	0.92	0.94	0.94	0.96	0.95
p-value	0.05	0.05	0.01	0.02	0.00	0.00	0.14	0.14	0.25	0.28	0.58	0.38
Silviculture							Pasture					
	<i>BD</i>	<i>TP</i>	<i>Mic</i>	<i>Mac</i>	<i>OC</i>	<i>K_{sat}</i>	<i>BD</i>	<i>TP</i>	<i>Mic</i>	<i>Mac</i>	<i>OC</i>	<i>K_{sat}</i>
Min	0.90	38.43	14.11	16.20	0.13	0.04	1.13	39.56	15.41	12.80	0.32	0.02
Max	1.63	65.93	47.54	49.60	2.12	3.19	1.60	57.33	35.24	36.21	2.52	1.45
Mean	1.35	48.91	20.76	28.15	0.94	0.89	1.40	47.05	22.53	24.52	1.21	0.50
S	0.20	7.37	7.35	7.88	0.50	0.89	0.13	4.84	5.98	6.34	0.64	0.48
CV	0.14	0.15	0.35	0.28	0.53	1.00	0.09	0.10	0.27	0.26	0.53	0.95
Kurt.	-0.72	0.72	2.50	0.76	0.66	1.22	-0.43	0.43	0.91	0.10	0.45	0.89
Skew.	0.13	0.13	6.95	0.91	-0.19	0.46	0.58	0.58	0.16	0.11	0.12	-0.43
S-W	0.94	0.94	0.72	0.94	0.94	0.83	0.88	0.88	0.91	0.96	0.93	0.88
p-value	0.90	38.43	14.11	16.20	0.13	0.04	0.14	0.14	0.31	0.73	0.42	0.13

1014 in which *BD*: Bulk density (g cm⁻³), *TP*: Total porosity (%), *Mic*: Microporosity (%), *Mac*: Macroporosity (%), *OC*: Soil Organic Carbon (g cm⁻³), *K_{sat}*: Saturated hydraulic
1015 conductivity (m/h), Min: Minimum; Max: Maximum, S: Standard deviation, CV: coefficient of variation, Kurt: kurtosis, Skew: Skewness, S-W: Shapiro-Wilk normality test
1016 with 5% of significance level and p-value: Probability of significance.

Several key insights were realized based on the results of the hydraulic-energy indices across different land uses (Table 2). The analysis evidenced the significant impact of land use on soil physical properties and hydrological dynamics. Forested areas, including native forests and silviculture, generally show higher DP and $PAWC$, suggesting superior soil physical health. All land uses showed mean $PAWC$ results $\geq 20\%$ in volume, which is considered an excellent range threshold by Reynolds *et al.* (2009) for Canadian soils. In soils under native forest and pasture, about 80% of the hydraulic energy was associated with water retention (WR_{r-pF}), leaving about 20% for soil aeration (A_{r-pF}). This energy was smaller in soils under annual crops and silviculture. The soil under pasture showed the lowest mean WR_{a-pF} value but the greatest mean AW_{r-pF} value, indicating a balance between the hydraulic energy used for aeration and water retention.

The hydraulic-energy indices and soil physical properties presented in Table 2 underscore the influence of land use on soil structure, water dynamics, and overall the soil physical quality, highlighting the importance of sustainable land management practices that promote soil health, biodiversity conservation, and ecosystem resilience. Further detailed analyses, particularly relating to temporal variations and climatic impacts may provide additional insights into how these physical properties influence soil water availability and plant growth, supporting informed decision-making for land use and water resource management strategies.

1036 Table 2 - Hydraulic-energy indices obtained from soil samples collected in regions occupied by different land uses.

Annual crops										Native forest									
	DP	$PAWC$	A_{a-pF}	WR_{a-pF}	A_{r-pF}	WR_{r-pF}	AW_{r-pF}	A_{a-pF}/DP	$WR_{a-pF}/PAWC$	DP	$PAWC$	A_{a-pF}	WR_{a-pF}	A_{r-pF}	WR_{r-pF}	AW_{r-pF}	A_{a-pF}/DP	$WR_{a-pF}/PAWC$	
Min	0.002	0.147	0.000	0.301	0.05	67.64	0.05	0.093	1.241	0.083	0.185	0.054	0.371	9.42	60.44	10.40	0.567	1.544	
Max	0.213	0.545	0.239	0.795	32.36	99.95	47.85	1.369	2.524	0.319	0.317	0.335	0.604	39.56	90.58	65.46	1.246	2.470	
Mean	0.102	0.281	0.074	0.538	11.91	88.09	14.25	0.671	1.952	0.165	0.269	0.139	0.514	20.68	79.32	27.36	0.824	1.932	
S	0.044	0.061	0.046	0.084	6.91	6.91	9.44	0.240	0.222	0.058	0.036	0.068	0.053	7.85	7.85	13.86	0.208	0.224	
CV	0.431	0.217	0.618	0.156	0.58	0.08	0.66	0.357	0.114	0.349	0.132	0.492	0.103	0.38	0.10	0.51	0.252	0.116	
Kurt.	-0.124	2.009	1.143	-0.099	-0.09	-0.09	1.18	-0.051	0.552	0.878	-1.052	1.299	-0.768	0.69	-0.69	1.20	-0.852	0.586	
Skew.	0.125	0.503	0.837	0.045	0.43	-0.43	0.91	0.187	0.190	0.881	0.290	1.856	1.313	0.04	0.04	1.21	0.574	0.637	
S-W	0.991	0.966	0.951	0.993	0.97	0.97	0.94	0.995	0.981	0.935	0.884	0.891	0.937	0.96	0.96	0.90	0.918	0.966	
p-value	0.583	0.004	0.000	0.804	0.01	0.01	0.00	0.946	0.092	0.240	0.030	0.041	0.254	0.52	0.52	0.06	0.120	0.710	
Silviculture										Pasture									
	DP	$PAWC$	A_{a-pF}	WR_{a-pF}	A_{r-pF}	WR_{r-pF}	AW_{r-pF}	A_{a-pF}/DP	$WR_{a-pF}/PAWC$	DP	$PAWC$	A_{a-pF}	WR_{a-pF}	A_{r-pF}	WR_{r-pF}	AW_{r-pF}	A_{a-pF}/DP	$WR_{a-pF}/PAWC$	
Min	0.064	0.187	0.044	0.409	8.96	66.06	9.85	0.452	1.432	0.088	0.135	0.050	0.354	8.29	61.42	9.04	0.557	1.906	
Max	0.223	0.385	0.224	0.709	33.94	91.04	51.38	1.174	2.489	0.187	0.291	0.223	0.555	38.58	91.71	62.81	1.652	2.728	
Mean	0.148	0.284	0.117	0.546	17.44	82.56	21.94	0.792	1.957	0.130	0.206	0.145	0.448	24.47	75.53	34.04	1.111	2.219	
S	0.050	0.062	0.051	0.092	6.67	6.67	10.69	0.199	0.246	0.034	0.049	0.054	0.067	8.93	8.93	15.60	0.334	0.260	
CV	0.340	0.218	0.438	0.169	0.38	0.08	0.49	0.251	0.126	0.261	0.236	0.375	0.149	0.36	0.12	0.46	0.301	0.117	
Kurt.	-0.102	0.204	0.542	0.243	0.80	-0.80	1.20	-0.238	0.747	0.213	0.414	-0.413	0.233	-0.37	0.37	0.09	-0.452	-0.060	
Skew.	-1.270	-1.206	-0.691	-1.139	0.17	0.17	1.12	0.373	0.132	-1.253	-0.693	-0.812	-0.938	-0.60	-0.60	-0.47	-0.216	0.723	
S-W	0.944	0.938	0.948	0.941	0.93	0.93	0.89	0.940	0.968	0.928	0.965	0.965	0.955	0.96	0.96	0.97	0.962	0.946	
p-value	0.288	0.220	0.344	0.251	0.18	0.18	0.03	0.242	0.723	0.431	0.842	0.839	0.733	0.79	0.79	0.88	0.814	0.623	

1037 In which DP : Drainable porosity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), $PAWC$: Plant available water content ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), A_{a-pF} : Absolute aeration energy index [$\log(\text{cm}) \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], A_{r-pF} : Relative aeration
1038 energy index (%), WR_{a-pF} : Absolute water retention energy index [$\log(\text{cm}) \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], WR_{r-pF} : Relative water retention energy index (%), AW_{r-pF} : Relative air-water energy (%),
1039 Min: Minimum, Max: Maximum, S: Standard deviation, CV: coefficient of variation, Kurt: kurtosis, Skew: Skewness, S-W: Shapiro-Wilk normality test with 5% of significance
1040 level and p-value: Probability of significance.

The analysis of the matric flux indices (Table 3) revealed relevant insights into soil physical properties across different land uses. In areas under annual crops, notably large mean values of MF_{Aa} and MF_{WRa} indicate great variability in air and water fluxes in soil matrix compared to other land uses. This suggests a potentially less stable soil structure, adversely affecting water movement and contributing to greater heterogeneity in these physical properties. Conversely, native forests exhibited lower coefficients of variation (CV) for MF_{Aa} and MF_{WRa} , reflecting more uniform soil conditions with consistent air and water fluxes. Areas under silviculture and pastures display intermediate values for MF_{Aa} and MF_{WRa} , with varying degrees of CV, indicating moderate heterogeneity in soil physico-hydraulic properties under these management practices.

The high MF_{Ar} results across all land uses emphasizes a predominance of great drainable porosity ranges under well-structured soil skeleton, suggesting the existence of macro and mesopores that may provide preferential flow paths, which enhance drainage and consequently the air movement within the soil matrix. This observation is consistent when the previous tables are analyzed, particularly regarding the sandy texture of this soil.

In summary, these findings play a critical role of land use in shaping soil physical properties and how they support the hydrological dynamics within a watershed. Native forests emerge as resilient ecosystems with superior soil health, characterized by higher values in all matric flux indices. In contrast, annual crops often exhibited the lowest values for these indices, indicating less air and water flow. These insights accentuate the importance of sustainable management practices that prioritize soil conservation to ensure long-term productivity and environmental sustainability across diverse land use contexts.

1064 Table 3 – Matric Flux indices obtained from soil samples collected in regions occupied by different land uses.

Annual crops						Native forest				
	<i>MFAa</i>	<i>MFWRa</i>	<i>MFAr</i>	<i>MFWRr</i>	<i>MFAWr</i>	<i>MFAa</i>	<i>MFWRa</i>	<i>MFAr</i>	<i>MFWRr</i>	<i>MFAWr</i>
Min	0.414	0.045	82.88	2.19	4.84	4.521	0.162	92.82	1.46	12.93
Max	726.126	33.791	97.81	17.12	44.58	880.472	23.549	98.54	7.18	67.51
Mean	66.650	3.877	93.23	6.77	16.88	260.030	9.116	96.19	3.81	29.46
S	86.279	4.553	3.22	3.22	7.66	201.188	6.041	1.46	1.46	13.12
CV	129.451	117.450	3.46	47.61	45.41	77.371	66.266	1.52	38.31	44.55
Kurt.	29.993	21.339	1.43	1.43	1.47	4.695	1.362	0.08	0.08	2.95
Skew.	4.570	4.050	-1.31	1.31	0.94	1.828	1.133	-0.59	0.59	1.44
S-W	0.607	0.613	0.88	0.88	0.95	0.000	0.907	0.96	0.96	0.89
p-value	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.009	0.075	0.68	0.68	0.04
Silviculture						Pasture				
	<i>MFAa</i>	<i>MFWRa</i>	<i>MFAr</i>	<i>MFWRr</i>	<i>MFAWr</i>	<i>MFAa</i>	<i>MFWRa</i>	<i>MFAr</i>	<i>MFWRr</i>	<i>MFAWr</i>
Min	6.992	0.247	92.17	1.98	11.77	20.420	0.643	92.96	1.62	13.21
Max	1045.732	21.106	98.02	7.83	49.55	823.994	29.604	98.38	7.04	60.73
Mean	146.189	5.490	95.44	4.56	24.11	206.010	6.949	96.34	3.66	30.62
S	224.191	5.1306	1.68	1.68	9.88	247.338	8.508	1.52	1.52	13.15
CV	153.357	93.447	1.76	36.84	40.98	120.061	122.434	1.58	41.45	42.96
Kurt.	15.235	3.412	-0.49	-0.49	0.87	4.435	6.791	1.96	1.96	2.53
Skew.	3.722	1.740	-0.53	0.53	1.01	2.040	2.472	-1.17	1.17	1.25
S-W	0.526	0.826	0.95	0.95	0.92	0.749	0.693	0.92	0.92	0.92
p-value	0.000	0.002	0.33	0.33	0.09	0.003	0.001	0.40	0.40	0.32

1065 In which *MF_{Aa}*: Matric Flux Absolute aeration energy index [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], *MF_{Ar}*: Matric Flux Relative aeration energy index (%), *MF_{WRa}*: Matric Flux Absolute water retention
1066 energy index [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], *MF_{WRr}*: Matric Flux Relative water retention energy index (%), *MF_{AWr}*: Matric Flux Relative air-water energy (%), Min: Minimum, Max: Maximum,
1067 S: Standard deviation, CV: coefficient of variation, Kurt: kurtosis, Skew: Skewness, S-W: Shapiro-Wilk normality test with 5% of significance level and p-value: Probability
1068 of significance.

3.2 *Spearman correlations*

The analysis revealed that some variables did not follow a normal distribution, as indicated by the Shapiro-Wilk test (p -value below 0.05). Therefore, the Spearman's correlation was used to analyze the physical properties for each land use in the watershed (Tables 4, 5, 6, and 7). In these tables, the values above the main diagonal represent the p -values associated with Spearman's correlations, while the values below the main diagonal represent the Spearman's correlation coefficients.

1076

Table 4 – Spearman Correlation and p -values between the physical properties, hydraulic-energy indices and the matric flux indices of

1077

soils under annual crops in ECW.

	BD	TP	Mic	Mac	OC	K_{sat}	DP	$PAWC$	A_{a-pF}	WR_{a-pF}	A_{r-pF}	WR_{r-pF}	AW_{r-pF}	A_{a-pF}/DP	$WR_{a-pF}/PAWC$	MFA_a	MFW_{Ra}	MFA_r	MFW_{Rr}	MFA_{Wr}	Clay	Silt	Sand
BD	1.000	0.000	0.230	0.000	0.073	0.000	0.034	0.001	0.283	0.006	0.961	0.961	0.960	0.165	0.004	0.000	0.000	0.299	0.300	0.300	0.064	0.590	0.215
TP	-1.000	1.000	0.230	0.000	0.073	0.000	0.034	0.001	0.284	0.005	0.963	0.963	0.962	0.164	0.004	0.000	0.000	0.299	0.300	0.300	0.064	0.589	0.215
Mic	0.110	-0.110	1.000	0.000	0.008	0.000	0.537	0.389	0.097	0.000	0.443	0.443	0.443	0.008	0.000	0.000	0.000	0.335	0.335	0.335	0.000	0.593	0.000
Mac	-0.760	0.760	-0.688	1.000	0.818	0.000	0.337	0.023	0.442	0.733	0.344	0.344	0.345	0.001	0.000	0.000	0.000	0.315	0.314	0.314	0.003	0.315	0.088
OC	-0.164	0.164	0.240	-0.021	1.000	0.000	0.337	0.023	0.442	0.733	0.344	0.344	0.345	0.001	0.939	0.174	0.644	0.001	0.001	0.001	0.474	0.000	0.000
K_{sat}	-0.512	0.512	-0.590	0.731	0.079	1.000	0.387	0.010	0.017	0.686	0.011	0.011	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.393	0.395	0.395	0.002	0.000	0.000
DP	-0.193	0.193	0.057	0.088	-0.172	-0.079	1.000	0.909	0.000	0.423	0.000	0.000	0.000	0.000	0.576	0.000	0.363	0.000	0.000	0.000	0.084	0.000	0.000
$PAWC$	-0.309	0.309	0.079	0.206	0.271	0.234	-0.011	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.295	0.000	0.000	0.000	0.154	0.000	0.062
A_{a-pF}	-0.098	0.098	0.151	-0.071	-0.204	-0.217	0.881	-0.350	1.000	0.071	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.263	0.000	0.000	0.000	0.051	0.000	0.000
WR_{a-pF}	-0.251	0.251	0.372	-0.031	0.351	-0.037	0.074	0.865	-0.165	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.002	0.030	0.001	0.001	0.001	0.003	0.018	0.837
A_{r-pF}	-0.004	0.004	0.070	-0.087	-0.282	-0.231	0.791	-0.526	0.958	-0.376	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.210	0.000	0.000	0.000	0.176	0.000	0.000
WR_{r-pF}	0.004	-0.004	-0.070	0.087	0.282	0.231	-0.791	0.526	-0.958	0.376	-1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.210	0.000	0.000	0.000	0.176	0.000	0.000
AW_{r-pF}	-0.005	0.004	0.070	-0.087	-0.282	-0.231	0.791	-0.525	0.958	-0.376	1.000	-1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.209	0.000	0.000	0.000	0.176	0.000	0.000
A_{a-pF}/DP	0.127	-0.127	0.242	-0.299	-0.214	-0.382	0.489	-0.705	0.804	-0.411	0.867	-0.867	0.866	1.000	0.000	0.000	0.536	0.000	0.000	0.000	0.073	0.000	0.000
$WR_{a-pF}/PAWC$	0.258	-0.258	0.464	-0.516	-0.007	-0.538	0.051	-0.641	0.419	-0.226	0.470	-0.470	0.469	0.816	1.000	0.772	0.229	0.076	0.077	0.077	0.010	0.001	0.000
MFA_a	-0.426	0.426	-0.421	0.532	-0.124	0.638	0.472	-0.233	0.500	-0.282	0.524	-0.524	0.524	0.373	0.027	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.173	0.074	0.440
MFW_{Ra}	-0.451	0.451	-0.486	0.596	0.042	0.852	0.083	-0.096	0.103	-0.197	0.115	-0.115	0.115	0.057	-0.110	0.870	1.000	0.122	0.121	0.121	0.015	0.108	0.025
MFA_r	-0.095	0.095	-0.088	0.092	-0.307	-0.078	0.892	-0.319	0.916	-0.286	0.931	-0.931	0.931	0.652	0.162	0.561	1.000	0.000	0.000	0.000	0.472	0.000	0.000
MFW_{Rr}	0.095	-0.095	0.088	-0.092	0.306	0.078	-0.893	0.319	-0.916	0.286	-0.930	0.930	-0.931	-0.652	-0.162	-0.561	-0.142	-1.000	1.000	0.000	0.470	0.000	0.000
MFA_{Wr}	-0.095	0.095	-0.088	0.092	-0.306	-0.078	0.893	-0.319	0.916	-0.286	0.930	-0.930	0.931	0.652	0.162	0.561	0.142	1.000	-1.000	1.000	0.470	0.000	0.000
Clay	-0.169	0.169	0.635	-0.272	0.066	-0.276	0.158	0.130	0.178	0.267	0.124	-0.124	0.124	0.164	0.233	-0.125	-0.221	0.066	-0.066	0.066	1.000	0.183	0.000
Silt	0.049	-0.050	0.049	-0.092	-0.606	-0.321	0.481	-0.326	0.545	-0.215	0.588	-0.588	0.588	0.516	0.295	0.163	-0.147	0.569	-0.569	0.569	0.122	1.000	0.000
Sand	0.114	-0.113	-0.338	0.156	0.433	0.362	-0.433	0.170	-0.499	0.019	-0.493	0.493	-0.493	-0.467	-0.329	-0.071	0.204	-0.451	0.451	-0.451	-0.651	0.787	1.000

in which BD : Bulk density (g cm^{-3}), TP : Total porosity (%), Mic : Microporosity (%), Mac : Macroporosity (%), OC : Soil Organic Carbon (g cm^{-3}), K_{sat} : Saturated hydraulic conductivity (cm/h), θ_{s-pF} : volumetric water content at the saturation point ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{f-pF} : volumetric water content at field capacity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{pwp-pF} : volumetric water content at permanent wilting point ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), α_{pF} : SWRC scale factor, n_{pF} : shape parameter, DP : Drainable porosity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), $PAWC$: Plant available water content ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), A_{a-pF} : Absolute aeration energy index [$\log(\text{cm}) \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], A_{r-pF} : Relative aeration energy index (%), WR_{a-pF} : Absolute water retention energy index [$\log(\text{cm}) \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], WR_{r-pF} : Relative water retention energy index (%), AW_{r-pF} : Relative air-water energy (%), MFA_a : Matric Flux Absolute aeration energy index [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], MFA_r : Matric Flux Relative aeration energy index (%), MFA_{Wr} : Matric Flux Absolute water retention energy index [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], MFW_{Ra} : Matric Flux Relative aeration energy index (%) and MFW_{Rr} : Matric Flux Relative water retention energy index (%) and MFW_{AWr} : Matric Flux Relative air-water energy (%).

1078

1079

Table 5 – Spearman Correlation and p -values between the physical properties, hydraulic-energy indices and the matric flux indices of

1080

soils under pasture in ECW.

	BD	TP	Mic	Mac	OC	K_{sat}	DP	$PAWC$	A_{a-pF}	WR_{a-pF}	A_{r-pF}	WR_{r-pF}	AW_{r-pF}	A_{a-pF}/DP	$WR_{a-pF}/PAWC$	MFA_a	MFW_{Ra}	MFA_r	MFW_{Rr}	MFA_{Wr}	Clay	Silt	Sand
BD	1.000	0.000	0.043	0.627	0.374	0.803	0.174	0.345	0.489	0.699	0.511	0.511	0.511	0.393	0.229	0.385	0.310	0.467	0.467	0.467	0.060	0.310	0.082
TP	-1.000	1.000	0.043	0.627	0.374	0.803	0.174	0.345	0.489	0.699	0.511	0.511	0.511	0.393	0.229	0.385	0.310	0.467	0.467	0.467	0.060	0.310	0.082
Mic	-0.648	0.648	1.000	0.162	0.854	0.446	0.726	0.544	0.855	1.000	0.934	0.934	0.934	0.555	0.467	0.511	0.405	0.960	0.960	0.960	0.138	0.987	0.260
Mac	-0.176	0.176	-0.479	1.000	0.424	0.008	0.328	0.510	0.347	0.907	0.260	0.260	0.260	0.364	0.365	0.033	0.002	0.229	0.229	0.229	0.627	0.074	0.446
OC	0.316	-0.316	-0.067	-0.286	1.000	0.868	0.663	0.486	0.675	0.284	0.487	0.487	0.487	0.687	0.934	0.802	0.763	0.510	0.510	0.510	0.026	0.393	0.020
K_{sat}	-0.091	0.091	-0.273	0.782	-0.061	1.000	0.511	0.166	0.260	0.637	0.138	0.138	0.138	0.035	0.025	0.048	0.005	0.162	0.162	0.162	0.751	0.029	0.533
DP	0.467	-0.467	-0.127	-0.345	-0.158	-0.236	1.000	0.907	0.009	0.880	0.048	0.048	0.048	0.920	0.803	0.934	0.405	0.019	0.019	0.019	0.328	0.726	0.310
$PAWC$	0.334	-0.334	-0.219	0.237	-0.250	0.474	0.043	1.000	0.132	0.000	0.035	0.035	0.035	0.000	0.003	0.510	0.920	0.077	0.077	0.077	0.907	0.854	0.776
A_{a-pF}	0.248	-0.248	-0.067	-0.333	0.152	-0.394	0.770	-0.511	1.000	0.110	0.000	0.000	0.000	0.126	0.244	0.533	0.726	0.000	0.000	0.000	0.187	0.777	0.138
WR_{a-pF}	0.140	-0.140	0.000	0.043	-0.376	0.171	-0.055	0.899	-0.537	1.000	0.034	0.034	0.034	0.034	0.120	0.226	0.508	0.068	0.068	0.068	0.577	0.737	0.542
A_{r-pF}	0.236	-0.236	-0.030	-0.394	0.249	-0.503	0.636	-0.669	0.964	-0.671	1.000	0.000	0.000	0.042	0.128	0.651	0.603	0.000	0.000	0.000	0.214	0.987	0.150
WR_{r-pF}	-0.236	0.236	0.030	0.394	-0.249	0.503	-0.636	0.669	-0.964	0.671	-1.000	1.000	0.000	0.042	0.128	0.651	0.603	0.000	0.000	0.000	0.214	0.987	0.150
AW_{r-pF}	0.236	-0.236	-0.030	-0.394	0.249	-0.503	0.636	-0.669	0.964	-0.671	1.000	-1.000	1.000	0.042	0.128	0.651	0.603	0.000	0.000	0.000	0.214	0.987	0.150
A_{a-pF}/DP	-0.304	0.304	0.213	-0.322	0.146	-0.669	-0.036	-0.909	0.517	-0.670	0.650	-0.650	0.650	1.000	0.000	0.854	0.713	0.080	0.080	0.080	0.947	0.434	0.763
$WR_{a-pF}/PAWC$	-0.418	0.418	0.261	-0.321	0.030	-0.697	-0.091	-0.827	0.406	-0.524	0.515	-0.515	0.515	0.967	1.000	0.987	0.651	0.187	0.187	0.187	0.934	0.405	0.881
MFA_a	-0.309	0.309	-0.236	0.673	-0.091	0.636	-0.030	-0.237	0.224	-0.421	0.164	-0.164	0.164	0.067	-0.006	1.000	0.000	0.701	0.701	0.701	0.881	0.005	0.726
MFW_{Ra}	-0.358	0.358	-0.297	0.842	-0.109	0.806	-0.297	-0.036	-0.127	-0.238	-0.188	0.188	-0.188	-0.134	-0.164	0.927	1.000	0.556	0.556	0.556	0.701	0.013	0.511
MFA_r	0.261	-0.261	-0.018	-0.418	0.237	-0.479	0.721	-0.584	0.988	-0.598	0.988	-0.988	0.988	0.578	0.455	0.139	-0.212	1.000	0.000	0.000	0.174	0.987	0.117
MFW_{Rr}	-0.261	0.261	0.018	0.418	-0.237	0.479	-0.721	0.584	-0.988	0.598	-0.988	0.988	-0.988	-0.578	-0.455	-0.139	0.212	-1.000	1.000	0.000	0.174	0.987	0.117
MFA_{Wr}	0.261	-0.261	-0.018	-0.418	0.237	-0.479	0.721	-0.584	0.988	-0.598	0.988	-0.988	0.988	0.578	0.455	0.139	-0.212	1.000	-1.000	1.000	0.174	0.987	0.117
Clay	0.612	-0.612	-0.503	-0.176	0.693	-0.115	0.345	-0.043	0.455	-0.201	0.430	-0.430	0.430	0.024	-0.030	-0.055	-0.139	0.467	-0.467	0.467	1.000	0.651	0.000
Silt	0.358	-0.358	-0.006	-0.588	0.304	-0.685	-0.127	-0.067	-0.103	0.122	0.006	-0.006	0.006	0.280	0.297	-0.806	-0.745	-0.006	0.006	-0.006	0.164	1.000	0.533
Sand	-0.576	0.576	0.394	0.273	-0.717	0.224	-0.358	0.103	-0.503	0.220	-0.491	0.491	-0.491	-0.109	-0.055	0.127	0.236	-0.527	0.527	-0.527	-0.988	0.224	1.000

in which BD : Bulk density (g cm^{-3}), TP : Total porosity (%), Mic : Microporosity (%), Mac : Macroporosity (%), OC : Soil Organic Carbon (g cm^{-3}), K_{sat} : Saturated hydraulic conductivity (cm/h), θ_{s-pF} : volumetric water content at the saturation point ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{fc-pF} : volumetric water content at field capacity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{pwp-pF} : volumetric water content at permanent wilting point ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), α_{pF} : SWRC scale factor, n_{pF} : shape parameter, DP : Drainable porosity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), $PAWC$: Plant available water content ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), A_{a-pF} : Absolute aeration energy index [$\log(\text{cm}) \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], A_{r-pF} : Relative aeration energy index (%), WR_{a-pF} : Absolute water retention energy index [$\log(\text{cm}) \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], WR_{r-pF} : Relative water retention energy index (%), AW_{r-pF} : Relative air-water energy (%), MFA_a : Matric Flux Absolute aeration energy index [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], MFA_r : Matric Flux Relative aeration energy index (%), MFA_{Wr} : Matric Flux Absolute water retention energy index [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], MFW_{Rr} : Matric Flux Relative water retention energy index (%) and MFA_{AWr} : Matric Flux Relative air-water energy (%).

1081

1082

Table 6 – Spearman Correlation and p -values between the physical properties, hydraulic-energy indices and the matric flux indices of

1083

soils under native forest in ECW.

	BD	TP	Mic	Mac	OC	K_{sat}	DP	$PAWC$	A_{a-pF}	WR_{a-pF}	A_{r-pF}	WR_{r-pF}	AW_{r-pF}	A_{a-pF}/DP	$WR_{a-pF}/PAWC$	MFA_a	MFW_{Ra}	MFA_r	MFW_{Rr}	MFA_{Wr}	Clay	Silt	Sand
BD	1.000	0.000	0.103	0.000	0.078	0.016	0.081	0.330	0.224	0.899	0.341	0.341	0.341	0.804	0.813	0.002	0.021	0.168	0.168	0.168	0.418	0.723	0.565
TP	-1.000	1.000	0.103	0.000	0.078	0.016	0.081	0.330	0.224	0.899	0.341	0.341	0.341	0.804	0.813	0.002	0.021	0.168	0.168	0.168	0.418	0.723	0.565
Mic	-0.397	0.397	1.000	0.663	0.729	0.531	0.019	0.379	0.045	0.333	0.128	0.128	0.128	0.157	0.760	0.559	0.687	0.088	0.088	0.088	0.829	0.163	0.958
Mac	-0.769	0.769	-0.110	1.000	0.039	0.002	0.395	0.257	0.874	0.536	0.913	0.913	0.913	0.305	0.210	0.009	0.015	0.505	0.505	0.505	0.152	0.699	0.188
OC	-0.426	0.426	0.088	0.490	1.000	0.121	0.593	0.010	0.403	0.052	0.206	0.206	0.206	0.103	0.325	0.887	0.418	0.443	0.443	0.443	0.006	0.570	0.045
K_{sat}	-0.558	0.558	-0.158	0.688	0.379	1.000	0.657	0.144	0.459	0.971	0.458	0.458	0.458	0.046	0.135	0.007	0.001	0.984	0.984	0.984	0.861	0.779	0.945
DP	-0.422	0.422	0.546	0.214	0.135	0.112	1.000	0.086	0.000	0.997	0.000	0.000	0.000	0.340	0.116	0.036	0.610	0.000	0.000	0.000	0.836	0.226	0.494
$PAWC$	-0.244	0.244	0.221	0.282	0.592	0.358	0.415	1.000	0.751	0.069	0.544	0.544	0.544	0.042	0.011	0.809	0.749	0.712	0.712	0.712	0.076	0.446	0.153
A_{a-pF}	-0.301	0.301	0.478	0.040	-0.210	-0.186	0.800	-0.080	1.000	0.894	0.000	0.000	0.000	0.000	0.584	0.025	0.916	0.000	0.000	0.000	0.509	0.091	0.906
WR_{a-pF}	0.032	-0.032	0.242	-0.156	0.465	0.009	0.001	0.438	-0.034	1.000	0.422	0.422	0.422	0.738	0.165	0.408	0.700	0.193	0.193	0.193	0.465	0.746	0.391
A_{r-pF}	-0.238	0.238	0.373	0.028	-0.313	-0.187	0.767	-0.153	0.972	-0.202	1.000	0.000	0.000	0.001	0.729	0.018	0.855	0.000	0.000	0.000	0.311	0.076	0.829
WR_{r-pF}	0.238	-0.238	-0.373	-0.028	0.313	0.187	-0.767	0.153	-0.972	0.202	-1.000	1.000	0.000	0.001	0.729	0.018	0.855	0.000	0.000	0.000	0.311	0.076	0.829
AW_{r-pF}	-0.238	0.238	0.373	0.028	-0.313	-0.187	0.767	-0.153	0.972	-0.202	1.000	-1.000	1.000	0.001	0.729	0.018	0.855	0.000	0.000	0.000	0.311	0.076	0.829
A_{a-pF}/DP	-0.063	0.063	0.348	-0.256	-0.397	-0.475	0.239	-0.485	0.739	0.085	0.707	-0.707	0.707	1.000	0.001	0.244	0.726	0.110	0.110	0.110	0.161	0.383	0.460
$WR_{a-pF}/PAWC$	0.060	-0.060	0.078	-0.310	-0.246	-0.366	-0.383	-0.586	0.138	0.342	0.088	-0.088	0.088	0.718	1.000	0.984	0.283	0.307	0.307	0.307	0.180	0.964	0.323
MFA_a	-0.670	0.670	0.148	0.598	0.036	0.612	0.496	-0.061	0.526	-0.208	0.550	-0.550	0.550	0.289	0.005	1.000	0.002	0.014	0.014	0.014	0.489	0.106	0.766
MFW_{Ra}	-0.538	0.538	-0.102	0.565	0.203	0.715	-0.129	-0.081	-0.027	0.098	-0.046	0.046	-0.046	0.089	0.268	0.690	1.000	0.669	0.669	0.669	0.729	0.893	0.604
MFA_r	-0.340	0.340	0.414	0.168	-0.193	-0.005	0.878	0.094	0.850	-0.321	0.907	-0.907	0.907	0.389	-0.255	0.569	-0.108	1.000	0.000	0.000	0.515	0.226	0.926
MFW_{Rr}	0.340	-0.340	-0.414	-0.168	0.193	0.005	-0.878	-0.094	-0.850	0.321	-0.907	0.907	-0.907	-0.389	0.255	-0.569	0.108	-1.000	1.000	0.000	0.515	0.226	0.926
MFA_{Wr}	-0.340	0.340	0.414	0.168	-0.193	-0.005	0.878	0.094	0.850	-0.321	0.907	-0.907	0.907	0.389	-0.255	0.569	-0.108	1.000	-1.000	1.000	0.515	0.226	0.926
Clay	-0.203	0.203	0.055	0.352	0.624	0.044	0.053	0.429	-0.167	0.184	-0.253	0.253	-0.253	-0.345	-0.331	-0.174	-0.088	-0.164	0.164	-0.164	1.000	0.938	0.000
Silt	0.090	-0.090	-0.344	0.098	-0.143	0.071	0.300	-0.192	0.410	-0.082	0.428	-0.428	0.428	0.219	0.011	0.393	0.034	0.300	-0.300	0.300	-0.020	1.000	0.240
Sand	0.146	-0.146	-0.013	-0.325	-0.478	0.018	-0.172	-0.351	-0.030	-0.215	0.055	-0.055	0.055	0.186	0.247	0.075	0.131	0.024	-0.024	0.024	-0.917	0.292	1.000

in which BD : Bulk density (g cm^{-3}), TP : Total porosity (%), Mic : Microporosity (%), Mac : Macroporosity (%), OC : Soil Organic Carbon (g cm^{-3}), K_{sat} : Saturated hydraulic conductivity (cm/h), θ_{s-pF} : volumetric water content at the saturation point ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{f-pF} : volumetric water content at field capacity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{pwp-pF} : volumetric water content at permanent wilting point ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), α_{pF} : SWRC scale factor, n_{pF} : shape parameter, DP : Drainable porosity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), $PAWC$: Plant available water content ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), A_{a-pF} : Absolute aeration energy index [$\log(\text{cm}) \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], A_{r-pF} : Relative aeration energy index (%), WR_{a-pF} : Absolute water retention energy index [$\log(\text{cm}) \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], WR_{r-pF} : Relative water retention energy index (%), AW_{r-pF} : Relative air-water energy (%), MFA_a : Matric Flux Absolute aeration energy index [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], MFA_r : Matric Flux Relative aeration energy index (%), MFA_{Wr} : Matric Flux Absolute water retention energy index [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], MFA_{Rr} : Matric Flux Relative water retention energy index (%) and MFA_{AWr} : Matric Flux Relative air-water energy (%).

1084

1085

Table 7 – Spearman Correlation and p -values between the physical properties, hydraulic-energy indices and the matric flux indices of

1086

soils under silviculture in ECW.

	BD	TP	Mic	Mac	OC	K_{sat}	DP	$PAWC$	A_{a-pF}	WR_{a-pF}	A_{r-pF}	WR_{r-pF}	AW_{r-pF}	A_{a-pF}/DP	$WR_{a-pF}/PAWC$	MFA_a	MFW_{Ra}	MFA_r	MFW_{Rr}	MFA_{Wr}	Clay	Silt	Sand
BD	1.000	0.000	0.596	0.006	0.872	0.092	0.298	0.193	0.563	0.501	0.753	0.753	0.753	0.589	0.331	0.086	0.184	0.246	0.246	0.246	0.356	0.049	0.026
TP	-1.000	1.000	0.596	0.006	0.872	0.092	0.298	0.193	0.563	0.501	0.753	0.753	0.753	0.589	0.331	0.086	0.184	0.246	0.246	0.246	0.356	0.049	0.026
Mic	-0.126	0.126	1.000	0.005	0.183	0.004	0.729	0.676	0.547	0.524	0.569	0.569	0.569	0.663	0.905	0.003	0.002	0.622	0.622	0.622	0.007	0.591	0.289
Mac	-0.592	0.592	-0.603	1.000	0.381	0.002	0.659	0.992	0.543	0.887	0.691	0.691	0.691	0.762	0.907	0.000	0.000	0.673	0.673	0.673	0.502	0.016	0.191
OC	0.038	-0.038	0.310	-0.207	1.000	0.937	0.745	0.465	0.591	0.946	0.529	0.529	0.529	0.213	0.191	0.438	0.524	0.922	0.922	0.922	0.563	0.024	0.034
K_{sat}	-0.386	0.386	-0.614	0.644	-0.019	1.000	0.895	0.553	0.296	0.581	0.301	0.301	0.301	0.035	0.049	0.000	0.000	0.915	0.915	0.915	0.054	0.531	0.531
DP	-0.245	0.245	0.083	0.105	-0.078	-0.032	1.000	0.103	0.000	0.275	0.000	0.000	0.000	0.593	0.050	0.490	0.424	0.000	0.000	0.000	0.069	0.498	0.132
$PAWC$	-0.304	0.304	0.100	-0.002	0.173	0.141	0.375	1.000	0.997	0.000	0.292	0.292	0.292	0.012	0.003	0.553	0.345	0.674	0.674	0.674	0.519	0.879	0.855
A_{a-pF}	-0.138	0.138	0.143	0.145	-0.128	-0.246	0.857	0.001	1.000	0.546	0.000	0.000	0.000	0.011	0.990	0.479	0.530	0.000	0.000	0.000	0.014	0.402	0.039
WR_{a-pF}	-0.160	0.160	0.152	0.034	0.016	-0.131	0.256	0.796	0.143	1.000	0.471	0.471	0.471	0.873	0.672	0.344	0.370	0.730	0.730	0.730	0.723	0.545	0.704
A_{r-pF}	-0.075	0.075	0.135	0.095	-0.150	-0.244	0.762	-0.248	0.925	-0.171	1.000	0.000	0.000	0.007	0.967	0.369	0.622	0.000	0.000	0.000	0.003	0.304	0.019
WR_{r-pF}	0.075	-0.075	-0.135	-0.095	0.150	0.244	-0.762	0.248	-0.925	0.171	-1.000	1.000	0.000	0.007	0.967	0.369	0.622	0.000	0.000	0.000	0.003	0.304	0.019
AW_{r-pF}	-0.075	0.075	0.135	0.095	-0.150	-0.244	0.762	-0.248	0.925	-0.171	1.000	-1.000	1.000	0.007	0.967	0.369	0.622	0.000	0.000	0.000	0.003	0.304	0.019
A_{a-pF}/DP	0.129	-0.129	0.104	0.072	-0.291	-0.473	0.127	-0.551	0.558	-0.038	0.584	-0.584	0.584	1.000	0.000	0.942	0.907	0.458	0.458	0.458	0.075	0.383	0.091
$WR_{a-pF}/PAWC$	0.229	-0.229	0.029	0.028	-0.305	-0.445	-0.445	-0.628	-0.003	-0.101	0.010	-0.010	0.010	0.743	1.000	0.476	0.972	0.067	0.067	0.067	0.962	0.427	0.431
MFA_a	-0.394	0.394	-0.632	0.815	-0.184	0.830	0.164	-0.141	0.168	-0.223	0.212	-0.212	0.212	0.017	-0.169	1.000	0.000	0.235	0.235	0.235	0.531	0.132	0.486
MFW_{Ra}	-0.310	0.310	-0.644	0.768	-0.151	0.857	-0.189	-0.223	-0.149	-0.212	-0.117	0.117	-0.117	-0.028	0.008	0.904	1.000	0.701	0.701	0.701	0.184	0.289	0.995
MFA_r	-0.272	0.272	0.117	0.101	-0.023	0.026	0.923	0.100	0.835	-0.082	0.863	-0.863	0.863	0.176	-0.418	0.278	-0.092	1.000	0.000	0.000	0.017	0.561	0.110
MFW_{Rr}	0.272	-0.272	-0.117	-0.101	0.023	-0.026	-0.923	-0.100	-0.835	0.082	-0.863	0.863	-0.863	-0.176	0.418	-0.278	0.092	-1.000	1.000	0.000	0.017	0.561	0.110
MFA_{wr}	-0.272	0.272	0.117	0.101	-0.023	0.026	0.923	0.100	0.835	-0.082	0.863	-0.863	0.863	0.176	-0.418	0.278	-0.092	1.000	-1.000	1.000	0.017	0.561	0.110
Clay	-0.218	0.218	0.582	-0.159	0.138	-0.438	0.415	-0.153	0.538	-0.084	0.623	-0.623	0.623	0.406	-0.011	-0.149	-0.310	0.528	-0.528	0.528	1.000	0.826	0.069
Silt	-0.445	0.445	-0.128	0.529	-0.502	0.149	0.161	0.036	0.198	0.144	0.242	-0.242	0.242	0.206	0.188	0.349	0.250	0.138	-0.138	0.138	-0.053	1.000	0.000
Sand	0.496	-0.496	-0.250	-0.305	0.476	0.149	-0.349	0.044	-0.464	-0.091	-0.519	0.519	-0.519	-0.388	-0.187	-0.165	0.002	-0.368	0.368	-0.368	-0.415	0.814	1.000

in which BD : Bulk density (g cm^{-3}), TP : Total porosity (%), Mic : Microporosity (%), Mac : Macroporosity (%), OC : Soil Organic Carbon (g cm^{-3}), K_{sat} : Saturated hydraulic conductivity (cm/h), θ_{a-pF} : volumetric water content at the saturation point ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{f-pF} : volumetric water content at field capacity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{pwp-pF} : volumetric water content at permanent wilting point ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), α_{pF} : SWRC scale factor, n_{pF} : shape parameter, DP : Drainable porosity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), $PAWC$: Plant available water content ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), A_{a-pF} : Absolute aeration energy index [$\log(\text{cm}) \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], A_{r-pF} : Relative aeration energy index (%), WR_{a-pF} : Absolute water retention energy index [$\log(\text{cm}) \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], WR_{r-pF} : Relative water retention energy index (%), AW_{r-pF} : Relative air-water energy (%), MFA_a : Matric Flux Absolute aeration energy index [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], MFA_r : Matric Flux Relative aeration energy index (%), MFA_{wr} : Matric Flux Absolute water retention energy index [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], MFA_{wr} : Matric Flux Relative water retention energy index (%) and MFA_{wr} : Matric Flux Relative air-water energy (%).

1087

3.3 First level of the Hierarchical Flowchart (*BD*, *TP*, *Mic*, *Mac*, and *OC*)

Several significant correlations among the soil physico-hydraulic indices can be realized analyzing Tables 4, 5, 6, and 7 along with Figure 5. Some variable correlations were consistent across all land uses, reflecting inherent soil properties, while others were specific to different land uses. Specifically, in pasture, there was a moderate negative correlation between *BD* and *Mic*. In annual crops and native forest there was a strong negative correlation between *BD* and *Mac*, while in silviculture this correlation was moderately negative. Increased *BD* typically reduces *TP* as soil particles are packed more closely together. Despite reduced porosity, particle arrangement might create connectivity between soil pores.

In soils under native forest, there was no negative correlation between *Mac* and *Mic* due to the equilibrium between these two classes of porosity. This suggests that native forests maintain a healthy soil structure, where *Mac* and *Mic* are equilibrated, promoting good air-water movement and moisture retention, which are essential for healthy plant development. In silviculture, *BD* had a moderate negative correlation with the silt fraction, suggesting that denser soils tend to have a lower proportion of silt particles, possibly due to reduced inter-particle spaces in compacted soils. Conversely, *BD* moderate positive correlation with the sand fraction in silviculture, indicating that denser soils may contain a higher proportion of larger sand particles, likely reflecting a less aggregated soil structure.

In pasture, *BD* had a moderate positive correlation with the clay fraction, indicating the effect of animal trampling upon the fine clay particles can yield compacted soils. Conversely, *BD* had a moderate negative correlation with the sand fraction, suggesting that denser soils have a lower proportion of larger sand particles, likely due to the strong negative correlation between sand and clay fractions. Regarding the soil

texture, the clay fraction had a moderate positive correlation with *Mic* in areas under annual crops and silviculture, while in soils under pastures the correlation was moderately negative. Soils with a higher amount of clay tend to have more micropores due to the smaller size of clay particles.

In pasture soils, *OC* was positive correlated with the clay fraction and negative correlated with the sand fraction. The first correlation suggests that soils with higher clay content have a greater capacity to retain organic carbon due to the higher specific surface area and adsorption capacity of clay particles. The second correlation reinforces the idea that sandy soils have less organic carbon, possibly due to the lower capacity of sand particles to retain organic matter. Under silviculture, *OC* exhibited a positive correlation with the sand fraction and a negative correlation with the silt fraction. A high *Mac* result might indicate a decomposition and incorporation of organic carbon because it enhances air and water movement through the soil, creating necessary conditions for microbial activity and organic matter breakdown.

Under annual crops, native forests, and silviculture, compaction primarily affected the large pores, reducing *Mac*. However, soil scarification in annual crops improved the porosity in the topsoil layer. Understanding the interactions among the soil physical properties of the 1st level of the pyramid (Figure 2) is crucial for reaching an efficient and sustainable soil management, as these variables influence the water dynamics in the soil structure. The knowledge of these variables allows, therefore, a more quick and economical inference about some processes typically analyzed through more costly and time-consuming methods.

3.4 Second level of the Hierarchical Flowchart (K_{sat})

Under annual crops, K_{sat} was strongly positively correlated with Mac and moderately positively correlated with TP , and moderately negatively correlated with BD and Mic . These soils have agricultural practices such as tillage likely contribute to these conditions by disrupting soil particles, decreasing BD , increasing Mac and, therefore, the soil permeability to the water movement.

Under pastures, K_{sat} showed strong positive correlations with Mac , indicating that the soil permeability depend on Mac , which directly influences hydraulic conductivity. Additionally, K_{sat} is moderately negatively correlated with silt content, meaning that as the proportion of silt increases, the soil's ability to transmit water under saturation conditions decreases.

K_{sat} was moderately positively correlated with TP and Mac in native forests, and moderately negatively correlated with BD . This result indicates that native forests promote a great soil water movement due several issues, like the root growth that sustains the soil porosity. In sites under silviculture, K_{sat} was moderately positively correlated with Mac and moderately negatively correlated with Mic and clay. High Mac facilitates rapid water infiltration and drainage, enhanced by the hydraulic conductivity. Conversely, increased Mic and clay content hinder the soil water conductivity due to the smaller pore spaces and the electrical charge of clay particles.

3.5 Third level of the Hierarchical Flowchart (DP and $PAWC$)

The SPQ indices DP and $PAWC$ were correlated with the indices described in the first and second levels of the hierarchical flowchart. Under pasture lands, the DP data were moderately negatively correlated with TP , which may indicate that in the soils studied, the presence of micropores is dominating the soil structure, resulting in high total

porosity but low drainable porosity. This can occur due to factors such as compaction, soil composition, and land use.

Under native forests, *DP* showed moderate positive correlations with *TP* and *Mic* and a moderately negative correlation with *BD*. This indicates that native forests naturally accumulate higher *DP* due to favorable soil conditions characterized by high porosity, low compaction, and high root density, contributing to their resilience and ecosystem services.

PAWC in soils under pastures were moderately positively correlated with K_{sat} indicating a more consistent relationship between the water availability and the saturated hydraulic permeability in these systems. Under native forest, *PAWC* showed moderate positive correlations with *OC*, *DP*, and clay content, indicating a great soil water retention and drainage capacity at the same time for plant growth. These correlations underscore the role of soil organic matter and physical properties in sustaining water availability in natural forest ecosystems.

The correlations between *PAWC* and several other SPQ indices in different land uses highlight the importance of having an equilibrium between soil water retention and aeration to optimize crop growth and development. The unique analysis of *DP* and *PAWC* is sometimes limited because these indices stem from total ranges of water without revealing the specific arrangement of soil skeleton and the connectivity and distribution of pores (Turek *et al.*, 2021).

3.5 Fourth level of the Hierarchical Flowchart (A_{a-pF} , WR_{a-pF} , A_{r-pF} , WR_{r-pF} and AW_{r-pF})

This level of SPQ examination focuses on the hydraulic-energy indices integrated on the logarithmic scale of the SWRC (Armando and Wendroth, 2019; Bacher *et al.*, 2022), enabling a deeper assessment of the energies work on the soil water storage,

drainage and aeration processes. Under annual crops, A_{a-pF} showed strong positive correlations with DP revealing that this index manifest information about the soil structure capability of performing the water drainage, which is crucial for optimal growth conditions. In pasture lands, A_{a-pF} showed, respectively, strong and moderate positive correlations with DP and clay content, however, moderate negative correlations were found with $PAWC$ and sand as expected.

In native forest ecosystems A_{a-pF} exhibited strong positive correlations with DP and moderate positive correlations with Mic and silt. The greater is the soil microporosity, the greater is the energy worked by the gravity to perform the water drainage, revealing a feature of the soil structure. Under silviculture, A_{a-pF} was strong positive correlated with DP and moderate positive correlated with clay content, indicating that the greater is the soil structure when the clay amount is large, the larger is the result of A_{a-pF} . Negative moderate correlations between A_{a-pF} and sand enhance the knowledge that in sandy soils the water drainage process is faster than in clay soils, requiring a small amount of hydraulic-energy to perform it.

Under annual crops, pasture and silviculture the WR_{a-pF} index showed strong positive correlation with $PAWC$ and in native forest, this index showed moderate positive correlation with $PAWC$, as physically expected since WR_{a-pF} is integrated throughout the $PAWC$ range. In native forest, the moderate positive correlations with OC highlights the contribution of soil organic matter to the water retention capacity.

The relative hydraulic-energy indices A_{r-pF} , WR_{r-pF} , and AW_{r-pF} were correlated with several SPQ indices amongst all land management showing that de balance of energy associated with water drainage and retention reveals information about soil structure under all the land uses in this watershed. As an example, the AW_{r-pF} index exhibited strong positive correlations with DP in soils under annual crops, native forest, and silviculture,

and a moderate positive correlation in pasture lands, due to the balance of energy between aeration and water retention.

According to Eq. (8), this balance depends on the SPQ index A_{a-pF} , which is integrated throughout the entire DP range. In those soil uses, AW_{r-pF} was also correlated with texture fractions of clay and silt and $PAWC$, which is also present in Eq. (8). Understanding these correlations aids in developing tailored soil management practices that enhance water retention, aeration, and overall the soil physical quality. By monitoring these indicators appropriately, land managers can optimize agricultural yield, support biodiversity in natural ecosystems, and promote sustainable forestry practices, ensuring resilient and productive landscapes across diverse environmental conditions.

Through the hydraulic-energy indices, it is possible to have a finer analysis of SPQ, in case of impossibility to identify structural changes until the 3rd level of the hierarchical pyramid (Figure 2) due to the complexity in examining the soil structure or in case of seeking a deeper understanding about the hydraulic energies associated with the soil water retention and drainage processes described in the SWRC. These indices are effective in quantifying various physical phenomena previously considered inferences.

3.6 Fifth level of the Hierarchical Flowchart (A_{a-pF}/DP and $WR_{a-pF}/PAWC$)

The ratios A_{a-pF}/DP and $WR_{a-pF}/PAWC$ provide the information about the amount of cumulative energy of water drainage and retention per unit of drainable porosity and available water contents, respectively. Under annual crops, A_{a-pF}/DP was moderately positively correlated with the silt fraction and moderately negatively correlated with the sand content suggest that soils with high A_{a-pF}/DP may have reduced field capacity, low water availability at high potentials, and a pore structure that favors drainage and aeration over water retention.

In the soils under native forest ecosystems and silviculture practices, the ratio A_{a-pF}/DP was moderately negatively correlated with K_{sat} and $PAWC$ suggesting that these soils have a structural skeleton that perform quick water drainage.

In the soils under annual crops, the $WR_{a-pF}/PAWC$ index was moderately positively correlated with Mic and moderately negatively correlated with Mac and K_{sat} showing that the soil structures that are more destined to hold water have less features of transmitting this liquid, as expected. Similar results were noticed for the soils under pasture lands, native forest ecosystems and in silvicultural practices. A great equilibrium between the ratios of A_{a-pF}/DP and $WR_{a-pF}/PAWC$ indicates that the soil structure is conditioned to perform similar amounts of hydraulic energy destined to the soil aeration and water retention phenomena.

3.7 Sixth level of the Hierarchical Flowchart (MF_{Aa} , MF_{WRa} , MF_{Ar} , MF_{WRr} and MF_{AWr})

The matric flux potentials divided into the ranges of available water and drainable porosity may count a “partial-matric diffusivity” as a measure of soil structure status in a deeper analysis of double dimension for water transmission. The MF_{Aa} index, which is destined to the soil's water drainage and aeration region, was moderately positively correlated with TP , Mac , K_{sat} , DP , A_{a-pF} , A_{r-pF} and AW_{r-pF} in soils under annual crops validating its application as a SPQ indicator and, thus, a structural measure. Soils with high MF_{Aa} values tend to have great TP , Mac , and saturated hydraulic conductivity, enhancing a structure to supports water drainage. These features are vital for optimizing water use and root development in crops.

MF_{Aa} in pasturelands showed moderate positive correlations with Mac and K_{sat} , indicating that soils with high MF_{Aa} values benefit from high microporosity and hydraulic conductivity. In native forests, MF_{Aa} exhibited moderate negative correlation with BD

and moderate positive correlations with TP , Mac , K_{sat} , DP , A_{a-pF} , A_{r-pF} and AW_{r-pF} . In silvicultural practices, MF_{Aa} showed strong positive correlations with Mac and K_{sat} , and a moderate negative correlation with Mic , indicating the importance of microporosity in a water flux in the drainable porosity range.

In native forests, MF_{WRa} exhibited positive correlations with TP , Mac , K_{sat} , and MF_{Aa} , and negative correlation with BD . Similarly, soils under silvicultural practices showed positive correlations of MF_{WRa} with Mac and K_{sat} and a negative correlation with Mic .

The MF_{Ar} is a relative measure of matric fluxes and is associated with the process of soil's aeration. Under annual crops, strong positive correlations of MF_{Ar} with DP , A_{a-pF} , A_{r-pF} and AW_{r-pF} , and moderate positive correlations with the ratio A_{a-pF}/DP and silt indicate that soils with significant drainable porosity tend to exhibit a pore structure that favors aeration and water drainage. MF_{Ar} in pasture lands showed strong positive correlations with DP , A_{a-pF} , A_{r-pF} , AW_{r-pF} and moderate positive correlations with A_{a-pF}/DP , $WR_{a-pF}/PAWC$, and clay content indicating that soils possess significant aeration and drainage, this strong negative correlation with WR_{r-pF} and moderate negative correlations with Mac , K_{sat} , $PAWC$ and sand, suggests that in this land use, the pore structure does not favor soil permeability. Under native forests as well as the other land uses, MF_{Ar} exhibited strong positive correlations with DP , A_{a-pF} , A_{r-pF} and AW_{r-pF} , and moderate positive correlations with Mic and MF_{Aa} to explain that the water transmission by diffusivity is associated and controlled by the soil structure status.

The MF_{WRr} reflects the proportional matric flux in the water retention region, directly influencing the soil's capacity to store and provide water to plants. Under annual crops, strong positive correlations with WR_{r-pF} were found and the moderate positive correlation with sand content may appear counterintuitive, this index reveals that soil

behavior is multifaceted. Negative correlations of MF_{WRr} with DP , A_{a-pF} , A_{r-pF} , AW_{r-pF} , A_{a-pF}/DP , MF_{Aa} , MF_{Ar} , and silt are expected because they refer to the drainable porosity range. In pasturelands, the MF_{WRr} index showed strong positive correlation with WR_{r-pF} and moderate positive correlations with Mac , K_{sat} , $PAWC$, WR_{a-pF} , and sand, suggesting that hydraulic conductivity in this zone is governed by properties linked to soil aeration.

In native forests, MF_{WRr} exhibited strong positive correlations with WR_{r-pF} , strong negative correlations with DP , A_{a-pF} , A_{r-pF} , AW_{r-pF} and moderate negative correlations with Mic and MF_{Aa} , demonstrating that hydraulic conductivity in this land use is not correlated with this index. In silviculture similar results were observed.

The MF_{AWr} index was perfectly positively correlated with MF_{Ar} and perfectly negative correlated with MF_{WRr} in all uses, according to Eq. (15). This indice is strongly positively correlated in annual crops with DP , A_{a-pF} , A_{r-pF} , AW_{r-pF} and moderate positively correlated with A_{a-pF}/DP , and MF_{Aa} . It is strongly negatively correlated with WR_{r-pF} and moderate negatively correlated with sand content demonstrating its link with several SPQ indices to examine soil structure in the watershed. Similar patterns were observed in the correlation results for other land uses.

4. Conclusions

The analysis was proven to be efficient in prioritizing the "most easy-to-measure" to more "complex" SPQ indices. The lowest mean microporosity was found in areas without anthropogenic activity (native forest) compared to soils that underwent anthropogenic uses (annual crops, pastures, and silviculture) indicating a degree of anthropomorphization in the watershed.

Soils under annual crops and pasture showed similar correlations between Mac and K_{sat} enhancing the information about the soil structure function. In the lands with

annual crops, practices such as subsoiling mitigated the compaction existent in the plow layer (0-20 cm). The compacted areas were identified by the porosity decrease, plant-available water increase, and drainable porosity and saturated hydraulic conductivity decrease, which means a high probability of surface water runoff, erosion, and plant growth reduction.

Soils under pasture had their structure governed by microporosity whereas soils under native forest exhibited a better equilibrium between macro and microporosity, as also supported by the results of the hydraulic-energy and matric flux indices.

These findings played an important role of finding strategies that prioritize soil health and structure to enhance water availability, conductivity, and aeration, mitigating risks like erosion. Thus, sustainable land manages like conservation tillage, cover cropping, crop rotation, and agroforestry may improve soil structure and its function for the benefit of all watershed housers.

5. Acknowledgments

This study was partially financed by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

References

Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., de Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22 (6), 711–728. doi:10.1127/0941-2948/2013/0507

Armindo, R.A., Wendroth, O., 2016. Physical Soil Structure Evaluation based on Hydraulic Energy Functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 80 (5), 1167–1180. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.03.0058>

Armindo, R.A., Wendroth, O., 2019. Alternative approach to calculate soil hydraulic-energy-indices and -functions. *Geoderma* 355, 113903. doi:10.1016/j.geoderma.2019.113903

Bacher, M.G., Schmidt, O., Bondi, G., Creamer, R., Fenton, O., 2019. Comparison of Soil Physical Quality Indicators Using Direct and Indirect Data Inputs Derived from a Combination of In-Situ and Ex-Situ Methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 0 (0), 0. doi:10.2136/sssaj2018.06.0218

Bacher, M.G., Armindo, R.A., Schmidt, O., Bondi, G., Fenton, O., 2022. Testing numeric and logarithmic scales for hydraulic-energy indices and functions to assess physical earthworm effects on soil structure. *Geoderma Regional* 28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00466>

Basche, A.D., DeLonge, M.S., 2019. Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis. *PLoS ONE* 14 (9): e0215702. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>

Blake, G.R., Hartge, K.H., 1986. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1—Physical and Mineralogical Methods*, 2nd Edition, Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy—Soil Science Society of America, Madison, pp. 363–382.

Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W., Brussaard, L., 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biol. Biochem.* 120, 105–125. doi:10.1016/j.soilbio.2018.01.030

Daneshian, B., Habibagahi, G., Nikooee, E., 2021. Determination of unsaturated hydraulic conductivity of sandy soils: a new pore network approach. *Acta Geotech.* 16, 449–466. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01088-3>

de Melo, M.L.A., Inforsato, L., Pinheiro, E.A.R., De Jong Van Lier, Q., 2023. Plant available water predicted by a flux-based approach, *Geoderma* 429, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116253>.

De Jong Van Lier, Q., van Dam, J.C., Metselaar, K., de Jong, R., Duijnisveld, W.H.M., 2008. Macroscopic Root Water Uptake Distribution Using a Matric Flux Potential Approach. *Vadose Zone J.* 7 (3), 1065. doi:10.2136/vzj2007.0083

Drewry, J.J., Paton, R.J., 2005. Soil physical quality under cattle grazing of a winterfed brassica crop. *Soil Res.* 43 (4), 525.

Dos Santos, R.C.V., Soares, M.F., Timm, L.C., Siqueira, T.M., Mello, C.R., Beskow, S., Kaiser, D.R., 2021. Spatial uncertainty analysis of the saturated soil hydraulic conductivity in a subtropical watershed. *Environ. Earth Sci.* 80, 707. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10017-w>

Fuentes-Guevara, M.D., Armindo, R.A., Timm, L.C., Faria, L.C., 2022. Examining the land leveling impacts on the physical quality of lowland soils in Southern Brazil. *Soil Tillage Res.* 215, 105217. doi:10.1016/j.still.2021.105217

Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, Agronomy Monograph*, (2 eds.). ASA-SSSA, Madison, pp. 383–411.

Granatstein, D., Bezdicek, D.F., 1992. The need for a soil quality index: Local and regional perspectives. *Am. J. Altern. Agric.* 7 (1–2), 12. doi:10.1017/s0889189300004380

Grant, C.D., Groenevelt, P.H., 2015. Weighting the differential water capacity to account for declining hydraulic conductivity in a drying coarse-textured soil. *Soil Res.* 53 (4), 386. doi:10.1071/sr14258

Karlen, D.L., Ditzler, C.A., Andrews, S.S., 2003. Soil quality: why and how? *Geoderma* 114 (3–4), 145–156. doi:10.1016/s0016-7061(03)00039-9

Klute, A. (Ed.), 1986. Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods. 2nd Edition, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, USA.

Marion, L.F., Schneider, R., Cherubin, M.R., Colares, G.S., Wiesel, P.G., Costa, A.B., Lobo, E.A., 2022. Development of a soil quality index to evaluate agricultural cropping systems in southern Brazil. *Soil Tillage Res.* 218, 105293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105293>.

Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12, 513–522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>

Mualem, Y., Friedman, S.P., 1991. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. *Water Resour. Res.* 27, 2771–2777.

Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2*, 2nd ed. Agronomy Monograph vol. 9. ASA-SSSA, Madison, WI, pp. 534–580.

Pinheiro, E.A.R., De Jong Van Lier, Q., Metselaar, K., 2019. A matric flux potential approach to assess plant water availability in two climate zones in Brazil. *Vadose Zone J.* 17, 160083. doi:10.2136/vzj2016.09.0083

Prevedello, C.L., 1999. New method for estimating soil water content at field capacity condition. *Braz. J. Water Resour.* 4, 23–28. (In Portuguese). doi:10.21168/rbrh.v4n3.p23-28

Pulido-Moncada, M., Gabriels, D., Cornelis, W.M., 2014. Data-driven analysis of soil quality indicators using limited data. *Geoderma* 235–236, 271–278.

Rab, M.A., Nasta, P., Armindo, R.A., Beverly, C.R., Reynolds, W.D., Romano, N., 2023. Empirical equations for estimating field capacity in dryland cropping soils of southeastern Australia. *Soil Tillage Res.* 234, 105816. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105816>

Ratner, B., 2009. Challenges and opportunities for improved customer targeting using predictive analytics. *J. Target. Meas. Anal. Mark.* 17 (2), 157–171. doi:10.1057/jt.2009.5

Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Saxton, K.E., 1982. Estimation of Soil Water Properties. *Trans. ASAE* 25 (5), 1316–1320. doi:10.13031/2013.33720

Reynolds, W.D., Elrick, D.E., Youngs, E.G., Booltink, H.W.G., Bouma, J., 2002. Laboratory methods. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical Methods*, 3rd ed. SSSA, Madison, pp. 963–1008.

Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., Yang, X.M., 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152 (3–4), 252–263.

Soares, M.F., Centeno, L.N., Timm, L.C., Mello, C.R., Kaiser, D.R., Beskow, S., 2020. Identifying Covariates to Assess the Spatial Variability of Saturated Soil Hydraulic Conductivity Using Robust Cokriging at the Watershed Scale. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 20 (3), 1491–1502. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00228-8>

Soil Survey Staff, 2022. *Keys to Soil Taxonomy*, 13th edition. USDA-Natural Resources Conservation Service.

Timm, L.C., Pires, L.F., Centeno, L.N., Bitencourt, D.G.B., Parfitt, J.M.B., Campos, A.D.S., 2020. Assessment of land levelling effects on lowland soil quality indicators and water retention evaluated by multivariate and geostatistical analyses. *Land Degrad. Dev.* 31 (8), 959–974.

Turek, M.E., Armindo, R.A., Wendroth, O., 2021. Hydraulic energy indices reveal spatial dependence in a subtropical soil under maize crop in Southern Brazil. *Pedosphere* 31 (5), 771–782. doi:10.1016/s1002-0160(20)60093-5

Van Genuchten, M.T., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 (5), 892. doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

Van Genuchten, M.T., Nielsen, D.R., 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Ann. Geophys.* 3 (5), 615–628.

Wang, J.P., François, B., Lambert, P., 2016. Equations for hydraulic conductivity estimation from particle size distribution: A dimensional analysis. *Water Resour. Res.* 53 (9), 8127–8134. doi:10.1002/2017wr020888

Yu, M., Zhang, L., Xu, X., Feger, K.H., Wang, Y., Liu, W., Schwärzel, K., 2015. Impact of land-use changes on soil hydraulic properties of Calcaric Regosols on the Loess Plateau, NW China. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178 (3), 486–498.

Zhang, L., Wang, L., 2023. Optimization of site investigation program for reliability assessment of undrained slope using Spearman rank correlation coefficient. *Comput. Geotech.* 155, 105208. doi:10.1016/j.compgeo.2022.105208

7. Considerações Finais

A microporosidade revelou-se o principal indicador da qualidade física do solo (QFS) em áreas com pastagens, enquanto um equilíbrio entre macro e microporosidade foi observado em solos com floresta nativa. Foi possível observar diferenças significativas entre os valores da densidade do solo e da porosidade total, comumente usadas como indicadores da QFS. Porém, os índices de energia hidráulica, baseados nas curvas de retenção de água e de condutividade hidráulica, permitiram maior detalhamento na análise sobre os efeitos das práticas agrícolas, evidenciando melhor QFS em áreas cultivadas com floresta nativa e silvicultura.

De forma geral, níveis adequados de água disponível e aeração para o crescimento e desenvolvimento das plantas foram encontrados na camada de solo avaliada nos diferentes tipos de usos do solo. O índice desenvolvido permitiu identificar efetivamente áreas com vulnerabilidade edáfica, sendo sensível a alterações nos processos de aeração e retenção. Assim, sugere-se seu uso para avaliar a QFS e estabelecer faixas de referência para diferentes tipos e usos do solo sob diversos climas.

O fluxograma hierárquico de índices de qualidade física do solo, estruturado em diferentes níveis, mostrou-se uma ferramenta eficiente na tomada de decisões na bacia hidrográfica, ao priorizar os índices mais fáceis de medir em relação aos mais complexos. Práticas de manejo do solo e da água na bacia, como cultivo conservacionista, uso de cobertura do solo, rotação de culturas e agroflorestas, poderão ser adotadas levando em consideração os resultados encontrados.

8. Referências

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; DE MORAES GONÇALVES, J.L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ARAYA, S.N.; GHEZZEHEI, T.A. Using Machine Learning for Prediction of Saturated Hydraulic Conductivity and its Sensitivity to Soil Structural Perturbations. *Water Resources Research*, 2019. doi:10.1029/2018wr024357.

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.

BACHER, M. G.; SCHMIDT, O.; BONDI, G.; CREAMER, R.; FENTON, O. 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*, v. 83, n. 1, p. 5-17, jan. 2019.

BACHER, M.G.; ARMINDO, R.A.; SCHMIDT, O.; BONDI, G.; FENTON, O. Testing numeric and logarithmic scales for hydraulic-energy indices and functions to assess physical earthworm effects on soil structure. *Geoderma Regional*, v. 28, 2022.

BASCHE, A. D.; DeLONGE, M. S. Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis. *PLoS ONE*, v. 14, n. 9, e0215702, 2019.

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.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis. Part 1—Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy—Soil Science Society of America, 1986. v. 9, p. 363-382.

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

BRO, R.; SMILDE, A.K. Principal component analysis. **Analytical Methods**, v. 6, n. 9, p. 2812–2831, 2014.

BROOKS, R.H.; COREY, A.T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Paper**. Colorado State University, 1964.

BOTTA, G. F.; ANTILLE, D. L.; BIENVENIDO, F.; RIVERO, D.; AVILA-PEDRAZA, E. A.; CONTESSOTTO, E. E.; GHELFI, D. G.; NISTAL, A. I.; PELIZZARI, F. M.; ROCHA-MENESES, L. Effect of cattle trampling and farm machinery traffic on soil compaction of an Entic Haplustoll in a semiarid region of Argentina. **Agronomy Research**, v. 18, n. 2, p. 1163-1176, 2020.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G. de; GOEDE, R. de; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105-125, 2018.

CHAPUIS, R.P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 71, p. 401-434, 2012.

CLUNES, J.; VALLE, S.; DÖRNER, J.; MARTÍNEZ, O.; PINOCHET, D.; ZÚÑIGA, F.; BLUM, W. Soil fragility: a concept to ensure a sustainable use of soils. **Ecological Indicators**, v. 139, 2022.

DAI, C.; LIU, Y.; WANG, T.; LI, Z.; ZHOU, Y.; DENG, J. Quantifying the structural characteristics and hydraulic properties of shallow Entisol in a hilly landscape. **International Agrophysics**, v. 36, n. 2, p. 105-113, 2022.

DANESHIAN, B.; HABIBAGAH, G.; NIKOOEE, E. Determination of unsaturated hydraulic conductivity of sandy soils: a new pore network approach. **Acta Geotechnica**, v. 16, p. 449-466, 2021.

MELO, M. L. A. de; INFORSATO, L.; PINHEIRO, E. A. R.; JONG VAN LIER, Q. de. Plant available water predicted by a flux-based approach. **Geoderma**, v. 429, 2023.

DE JONG VAN LIER, Q.; VAN DAM, J. C.; METSELAAR, K.; DE JONG, R.; DUIJNISVELD, W. H. M. Macroscopic root water uptake distribution using a matric flux potential approach. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 3, p. 1065, 2008.

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.; DE PASCALE, V.; LIBERTI, M.; ROMANO, N. Saturated hydraulic conductivity of a sandy-loam soil determined using in situ falling head infiltration tests. **Geoderma**, v. 322, p. 29–36, 2018.

DREWRY, J.J.; PATON, R.J. Soil physical quality under cattle grazing of a winter-fed brassica crop. **Soil Use and Management**, v. 21, n. 2, p. 245-254, 2005.

DOS REIS, A. M. H.; ARMINDO, R. A.; PIRES, L. F. Physical assessment of a Haplohumox soil under integrated crop-livestock system. **Soil and Tillage Research**, v. 194, 104294, 2019.

DOS REIS, A. M. H.; AULER, A. C.; ARMINDO, R. A.; COOPER, M.; PIRES, L. F. Micromorphological analysis of soil porosity under integrated crop-livestock management systems. **Soil and Tillage Research**, v. 205, 104783, 2021.

DOS SANTOS, R. C. V.; SOARES, M. F.; TIMM, L. C.; SIQUEIRA, T. M.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. Spatial uncertainty analysis of the saturated soil hydraulic conductivity in a subtropical watershed. **Environmental Earth Sciences**, v. 80, p. 707, 2021.

ESRI. ArcGIS: Geographic Information System Software. Version 10.2.2. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2014.

FERRO, N. D.; SARTORI, L.; SIMONETTI, G.; BERTI, A.; MORARI, F. 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, 2014.

FOLEY, J. A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K. A.; CASSIDY, E. S.; GERBER, J. S.; JOHNSTON, M.;...; ZAKS, D. P. M. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, v. 478, n. 7369, p. 337–342, 2011

FUENTES-GUEVARA, M.D., ARMINDO, R.A., TIMM, L.C., & FARIA, L.C. Examining the land leveling impacts on the physical quality of lowland soils in Southern Brazil. **Soil Tillage Res.**, v. 215, 105217, 2022.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. Part 1. 2nd ed. Madison: ASA, SSSA, 1986. p. 383–411.

GRANATSTEIN, D.; BEZDICEK, D. F. The need for a soil quality index: Local and regional perspectives. **American Journal of Alternative Agriculture**, v. 7, n. 1-2, p. 12, 1992.

GRANT, C. D.; GROENEVELT, P. H. Weighting the differential water capacity to account for declining hydraulic conductivity in a drying coarse-textured soil. **Soil Research**, v. 53, n. 4, p. 386, 2015.

HARUNA, S.I.; TIDMAN, J.; MCDANIEL, M.D.; AL-KAISI, M.M. Soil organic carbon, aggregate stability, and hydraulic properties of soils under long-term no-till and tillage management. **Soil & Tillage Research**, v. 198, p. 104541, 2020.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V.L.M.; OLIVEIRA JUNIOR, G.J. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S Engineering and Science**, v. 5, n. 1, p. 83–90, 2015.

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

KARLEN, D. L.; DITZLER, C. A.; ANDREWS, S. S. Soil quality: why and how? **Geoderma**, v. 114, n. 3-4, p. 145–156, 2003.

KELISHADI, H.; MOSADDEGHI, M. R.; HAJABBASI, M. A.; AYOUBI, S. Near-saturated soil hydraulic properties as influenced by land use management systems in Koohrang region of central Zagros, Iran. **Geoderma**, v. 213, p. 426-434, 2014.

KIANI, M.; HERNANDEZ-RAMIREZ, G.; QUIDEAU, S.; SMITH, E.; JANZEN, H.; LARNEY, F. J. Quantifying sensitive soil quality indicators across contrasting

long-term land management systems: crop rotations and nutrient regimes. ***Agricultural Ecosystems and Environment***, v. 248, p. 123-135, 2017.

KIBBLEWHITE, M.; RITZ, K.; SWIFT, M. Soil health in agricultural systems. ***Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences***, v. 363, n. 1492, p. 685–701, 2008.

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

KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). ***Methods of Soil Analysis***. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed. Madison: ASA, SSSA, 1986. p. 687–734.

LARSON, R.; FARBER, B. ***Estatística aplicada***. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

LEI, L.; THOMPSON, J. A.; MCDONALD, L. M. Soil organic carbon pools and indices in surface soil: comparing a cropland, pasture, and forest soil in the Central Appalachian region, West Virginia, U.S.A. ***Communications in Soil Science and Plant Analysis***, p. 1–13, 2021.

LEPSCH, I.F. ***Formação e conservação dos solos***. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 254 p.

LI, H.; YAO, Y.; ZHANG, X.; ZHU, H.; WEI, X. Changes in soil physical and hydraulic properties following the conversion of forest to cropland in the black soil region of Northeast China. ***Catena***, [S.L.], v. 198, p. 104986, mar. 2021

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

LUO, L.; XU, L. Effects of biochar and biochar-based fertilizer on soil physical properties and wheat yield under saline–sodic conditions. ***Journal of Soil Science and Plant Nutrition***, v. 22, n. 2, p. 1042–1052

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.

MARION, L. F.; SCHNEIDER, R.; CHERUBIN, M. R.; COLARES, G. S.; WIESEL, P. G.; COSTA, A. B.; LOBO, E. A. Development of a soil quality index to evaluate agricultural cropping systems in southern Brazil. ***Soil and Tillage Research***, v. 218, 105293, 2022.

MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B. Integral energy as a measure of soil-water availability. ***Plant and Soil***, v. 249, p. 253–262, 2003.

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 Resources Research***, Washington, v. 12, p. 513-522, 1976.

MUALEM, Y.; DAGAN, G. Hydraulic Conductivity of Soils: Unified Approach to the Statistical Models¹. ***Soil Science Society of America Journal***, v. 42, n. 3, p. 392, 1978.

MUALEM, Y.; FRIEDMAN, S. P. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. **Water Resources Research**, v. 27, p. 2771–2777, 1991

MUSINGUZI, P.; EBANYAT, P.; TENYWA, J. S.; BASAMBA, T. A.; TENYWA, M. M.; MUBIRU, D. N. Critical soil organic carbon range for optimal crop response to mineral fertiliser nitrogen on a ferralsol. **Experimental Agriculture**, v. 52, n. 4, p. 635-653, 2016.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. (Eds.). **Methods of Soil Analysis**. Part 2. 2. ed. Agronomy Monograph, v. 9. Madison, WI: ASA-SSSA, 1982. p. 534–580.

NOVÁK, V.; HLAVÁČIKOVÁ, H. Soil-water retention curve. In: **Applied Soil Hydrology: Theory and Applications of Transport in Porous Media**, v. 32. 2019.

PEARSON, K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. **Philosophical Magazine**, v. 2, n. 11, p. 559-572, 1901.

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).

PINHEIRO, E. A. R.; DE JONG VAN LIER, Q.; METSELAAR, K. A matric flux potential approach to assess plant water availability in two climate zones in Brazil. **Vadose Zone Journal**, v. 17, 160083, 2019.

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.

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*. Vienna: **R Foundation for Statistical Computing**, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

RAB, M.A.; NASTA, P.; ARMINDO, R.A.; BEVERLY, C.R.; REYNOLDS, W.D.; ROMANO, N. Empirical equations for estimating field capacity in dryland cropping soils of southeastern Australia. **Soil and Tillage Research**, [S.L.], v. 234, p. 105816, out. 2023.

RAI, R. K.; SINGH, V. P.; UPADHYAY, A. **Soil analysis**. In: Planning and evaluation of irrigation projects. p. 505–523. 2017. doi:10.1016/b978-0-12-811748-4.00017-0.

RAMOS, H. M. M.; DUARTE, J. F. B.; SIMPLÍCIO, A. A. F.; OLIVEIRA, I. M. C.; FEITOSA, D. L. Atributos físico-hídricos de um neossolo quartzarênico sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 3968-3975, 30 jun. 2020.

RATNER, B. Challenges and opportunities for improved customer targeting using predictive analytics. **Journal of Targeting, Measurement and Analysis for Marketing**, v. 17, n. 2, p. 157–171, 2009.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. Estimation of soil water properties. **Transactions of the ASAE**, v. 25, n. 5, p. 1316-1320, 1983.

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.

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

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v. 27, n. 1, p. 29-48, 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242–254, 2009.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, 2008.

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; LU, X. 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.

RODRÍGUEZ, B.C.; DURÁN-ZUAZO, V.H.; RODRÍGUEZ, M.S.; GARCÍA-TEJERO, I.F.; RUIZ, B.G.; TAVIRA, S.C. Conservation agriculture as a sustainable system for soil health: a review. **Soil Systems**, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 87, 23 nov. 2022.

SANTOS, G. A. dos; DIAS JÚNIOR, M. de S.; GUIMARÃES, P. T. G.; FURTINI NETO, A. E. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays L.*) cultivadas em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 4, p. 740-752, 2005.

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

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, 104807, 2020.

SHAH, A.N.; TANVEER, M.; SHAHZAD, B.; YANG, G.; FAHAD, S.; ALI, S.; BUKHARI, M.A.; TUNG, S.A; HAFEEZ, A.I; SOULIYANONH, B. Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 24, n. 11, p. 10056-10067, 21 jan. 2017.

SILVA, A.J.P.; PINHEIRO, E.A.R.; VAN LIER, Q.J. Determination of soil hydraulic properties and its implications for mechanistic simulations and irrigation management. **Irrigation Science**, [S.L.], v. 38, n. 3, p. 223-234, 11 fev. 2020.

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.

SOARES, M.F.; TIMM, L.C.; SIQUEIRA, T.M.; SANTOS, R.C.V. dos; REICHARDT, K. Assessing the spatial variability of saturated soil hydraulic

conductivity at the watershed scale using the sequential Gaussian co-simulation method. **Catena**, [S.L.], v. 221, fev. 2023.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 13. ed. Washington, DC: USDA-Natural Resources Conservation Service, 2022.

STOESSEL, F.; SONDEREGGER, T.; BAYER, P.; HELLWEG, S. Assessing the environmental impacts of soil compaction in Life Cycle Assessment. **Science of the Total Environment**, v. 630, p. 913-921, 2018.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; ALVES, M. C.; REICHERT, J. M. Critical limits for soybean and black bean root growth, based on macroporosity and penetrability, for soils with distinct texture and management systems. **Sustainability**, v. 14, n. 5, p. 2958, 2022.

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**, v. 188, n. 2, p. 1-12, 2016.

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

TESFAHUNEGB, G. B.; GEBRU, T. A. Variation in soil properties under different cropping and other land-use systems in Dura catchment, Northern Ethiopia. **PLOS ONE**, v. 15, n. 2, e0222476, 2020.

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.

TUREK, M. E.; ARMINDO, R. A.; WENDROTH, O.; DOS SANTOS, I. Criteria for the estimation of field capacity and their implications for the bucket type model. ***European Journal of Soil Science***, v. 70, n. 2, p. 278-290, 2019.

TUREK, M. E.; ARMINDO, R. A.; WENDROTH, O. Hydraulic energy indices reveal spatial dependence in a subtropical soil under maize crop in Southern Brazil. ***Pedosphere***, v. 31, n. 5, p. 771-782, 2021.

USOWICZ, B.; LIPIEC, J. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity and its links with other soil properties at the regional scale. ***Scientific Reports***, v. 11, n. 1, p. 82-93, 2021.

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.

VAN GENUCHTEN, M. T.; NIELSEN, D. R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. ***Annales Geophysicae***, v. 3, n. 5, p. 615–628, 1985.

VÁRALLYAY, G. Soil resilience (is soil a renewable natural resource?). ***Cereal Research Communications***, v. 35, n. 2, p. 1277–1280, 2007.

VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. ***Soil Science***, v. 68, p. 75–94, 1949.

WANG, P.; HU, Z.; ZHAO, Y.; LI, X. Experimental study of soil compaction effects on GPR signals. ***Journal of Applied Geophysics***, v. 126, p. 128-137, 2016.

WANG, J. P.; FRANÇOIS, B.; LAMBERT, P. Equations for hydraulic conductivity estimation from particle size distribution: A dimensional analysis. **Water Resources Research**, v. 53, n. 9, p. 8127–8134, 2017.

WEN, T.; CHEN, X.; LUO, Y.; SHAO, L.; NIU, G. Three-dimensional pore structure characteristics of granite residual soil and their relationship with hydraulic properties under different particle gradation by X-ray computed tomography. **Journal of Hydrology**, v. 618, p. 129230, 2023.

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.

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

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.

ZHANG, Y.; SCHAAP, M. G. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: a review. **Journal of Hydrology**, [S.L.], 2019.

ZHANG, L.; WANG, L. Optimization of site investigation program for reliability assessment of undrained slope using Spearman rank correlation coefficient. **Computers and Geotechnics**, [S.L.], v. 155, 2023.

ZHAO, Y.; SUN, X.; WEN, T.; CHEN, R.; HUANG, L. Micro-structural evolution of granite residual soil under external loading based on X-ray micro-computed tomography. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 25, p. 1–14, 2021.