



LUCAS BIASI GASTALDON

**RELAÇÃO DOS ÍNDICES HIDRÁULICO-ENERGÉTICOS
COM A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO
SATURADO**

**LAVRAS - MG
2022**

LUCAS BIASI GASTALDON

**RELAÇÃO DOS ÍNDICES HIDRÁULICO-ENERGÉTICOS COM A
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Física, área de concentração em Física Experimental e Aplicada para a obtenção do título de Mestre.

Prof. D.Sc. Robson André Armindo
Orientador

Prof. D.Sc. Sérgio Martins De Souza
Coorientador

Prof. D.Sc. Tatiana Cardoso e Bufalo
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2022**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Gastaldon, Lucas Biasi.

Relação Dos Índices Hidráulico-Energéticos Com A
Condutividade Hidráulica Do Solo Saturado / Lucas Biasi
Gastaldon. - 2022.

88 p. : il.

Orientador(a): Robson André Armino.

Coorientador(a): Sérgio Martins de Souza, Tatiana Cardoso e
Bufalo.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. qualidade física do solo. 2. permeabilidade do solo. 3. curva
de retenção da água no solo. I. Armino, Robson André. II. de
Souza, Sérgio Martins. III. Cardoso e Bufalo, Tatiana. IV. Título.

LUCAS BIASI GASTALDON

**RELAÇÃO DOS ÍNDICES HIDRÁULICO-ENERGÉTICOS COM A
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO**

**RELATIONSHIP BETWEEN THE HYDRAULIC-ENERGY-INDICES AND THE
SATURATED SOIL HYDRAULIC CONDUCTIVITY**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Física, área de concentração em Física Experimental e Aplicada para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 28 de julho de 2022.

Dr Luís Carlos Timm, UFPel

Dr Cezar Francisco Araujo Junior, IDR – PARANÁ

Dr^a Aline Mari Huf Dos Reis, EMBRAPA

Prof. D.Sc. Robson André Armino
Orientador

Prof. D.Sc. Sérgio Martins De Souza
Coorientador

Prof. D.Sc. Tatiana Cardoso e Bufalo
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2022**

Ao arquiteto do universo, e aos meus pais, Jovana e Osvaldo.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecer ao Arquiteto do universo por me proporcionar a vida e seus deleites.

Agradeço ao Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Física (DFI) pelo apoio e infraestrutura para que eu pudesse efetuar essa pesquisa de forma plena.

Agradeço de forma imensurável e impossível de expressar em palavras aos meus pais, familiares e amigos que sempre me apoiaram e que em momentos de dificuldade me incentivaram a continuar. Também, na mesma proporção, agradeço ao meu orientador Robson André Armino pelas oportunidades, pela paciência e dedicação com minha orientação.

Agradeço ainda aos colegas da pós-graduação, em especial a Helena, Izabelly e Lucas pelos momentos de companheirismo e os de estudos, além de suas inestimáveis amizades.

A todos funcionários da UFLA, que possuem importante colaboração na formação de inúmeros estudantes, inclusive a minha.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Física pela oportunidade do curso de Mestrado em Física e assim a realização de um sonho acadêmico.

Por fim, agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) –Código de Financiamento 001.

Meu singelo agradecimento e eterna gratidão a todos que direta ou indiretamente fizeram parte desse ciclo.

*“A vida é como andar de bicicleta.
Para manter seu equilíbrio você deve continuar em movimento.”
(A. Einstein)*

RESUMO

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) é uma importante propriedade física que pode ser utilizada para caracterizar, interpretar e simular processos hidrológicos do solo. A análise da qualidade física do solo (QFS) geralmente se baseia nas propriedades de transferência e armazenamento de massa e energia que ocorrem nesse meio poroso. A curva de retenção de água do solo (CRAS) é uma função hidráulica amplamente utilizada e que está relacionada a QFS. Dessa forma, indicadores de QFS podem ser determinados a partir da CRAS, como distribuição de poros, capacidade de campo relativa, água disponível (AD), porosidade drenável (ϕ_D) e os índices hidráulico-energéticos do solo. Portanto, objetivou-se neste trabalho investigar a relação de K_s com os índices hidráulico-energéticos. Para isso, 395 CRAS's medidas, obtidas no banco de dados *Unsaturated Soil Hydraulic Database* versão 2.0 (UNSODA 2.0) (76%), artigos científicos da área (5%) e outras cedidas por colaboradores (19%), foram ajustadas a equação de van Genuchten (1980) com a restrição de Mualem (1976) (VGM) e delas extraídos os índices hidráulico-energéticos objetivando verificar se eles são correlacionáveis com K_s . Os ajustes e resultados (paramétricos e não paramétricos) encontrados foram separados de acordo com as classes texturais dos solos analisados. Verificou-se a influência significativa de K_s sobre ao menos um dos índices hidráulico-energéticos absolutos, energia absoluta de aeração do solo (A_a) e a energia absoluta de retenção de água (WR_a), em escala numérica para o agrupamento de todas as texturas e em escala numérica e logarítmica (pF) nas texturas argilosa e siltosa. Em quatro separações texturais houve influência de K_s sobre os dois índices. Houve também influência de K_s na soma dos índices absolutos em escala pF para 5 das 6 separações texturais, obtendo-se correlação linear significativa na textura argilosa quando aplicado o log na soma dos índices absolutos. Também foi observada influência de K_s na razão dos índices WR_a/AD em todas as separações feitas e A_a/ϕ_D em 4 das 6 separações sendo o uso desses índices recomendados para o desenvolvimento de equações de pedotransferência (PTFs) para a predição de K_s .

Palavras-chave: Qualidade física do solo. Permeabilidade do solo. Curva de retenção da água no solo.

ABSTRACT

The saturated soil hydraulic conductivity (K_s) is an important physical property that can be used to characterize, figure out and simulate soil hydrological processes. The analysis of the soil physical quality (SPQ) is usually based on its properties related to mass and energy transfer that occur in this porous medium. The soil water retention curve (SWRC) is a widely used hydraulic function that is related to SPQ. Thus, SPQ indicators can be derived from SWRC, such as the pore size distribution, relative field capacity, plant available water, drainable porosity, and soil hydraulic-energy indices. In this work, 395 measured SWRC's, available in the UNSODA 2.0 database (76%) and scientific articles (5%), and others provided by research collaborators (19%) were fitted to the van Genuchten (1980) with Mualem's restriction (1976) (VGM) equation. With the results of the vG parameters, the hydraulic-energy indices were obtained in order to verify whether they are correlated with K_s . The found parametric and non-parametric correlation results were split up according to the textural classes of the soils examined. The significant influence of K_s on at least one of the absolute hydraulic-energetic indexes (A_a and WR_a) was verified on the numerical scale when all textures were grouped and on both scales, numerical and logarithmic (pF) for clayey and silty textures. K_s showed significant impact on two absolute hydraulic-energy indices in four textural groups. Furthermore, K_s had influence on the sum of the absolute indices in pF scale for 5 of the 6 textural groups, with a significant linear correlation in the clayey texture when the logarithm was applied in the sum of the absolute indices. The significant K_s influence was also observed on the ratios WR_a/AD and A_a/ϕ_D in 4 of the 6 groups, and the use of these indices are recommended for the development of pedotransfer equations (PTFs) for the K_s prediction.

Keywords: Soil physical quality; Soil permeability; Soil water retention curve.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Água disponível
CDFP	Curva de distribuição de frequência dos tamanhos dos poros
CE	Com controle de esterco
CNT	Plantio direto escarificado
CRAS	Curva de retenção de água do solo
CT	Preparo convencional
DFI	Departamento de Física
G	Pastejo
ICN	Instituto de Ciências Naturais
IHO	Intervalo hídrico ótimo
MO	Matéria orgânica
MT	Preparo mínimo
NT	Plantio direto
PCC	Permeâmetro de carga constante
PCD	Permeâmetro de carga decrescente
PTF	Função de pedotransferência
QFS	Qualidade física do solo
S	Silagem
SCE	Sem controle de esterco
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
UFLA	Universidade Federal de Lavras
UNSODA 2.0	<i>Unsaturated Soil Hydraulic Database</i> versão 2.0
VGM	Equação de van Genuchten (1980) com a restrição de Mualem (1976)

LISTA DE SÍMBOLOS

K_s	Coefficiente de permeabilidade/conductividade hidráulica do solo saturado
ϕ_D	Porosidade drenável
AD	Água disponível
A_a	Energia absoluta de aeração do solo
WR_a	Energia absoluta de retenção de água
A_r	Energia relativa de aeração do solo
WR_r	Energia relativa de retenção de água
AW_r	Energia relativa entre retenção de ar-água
pF	Escala logarítmica
A_{a-pF}	Energia absoluta de aeração do solo em escala logarítmica
WR_{a-pF}	Energia absoluta de retenção de água em escala logarítmica
A_{r-pF}	Energia relativa de aeração do solo em escala logarítmica
WR_{r-pF}	Energia relativa de retenção de água em escala logarítmica
AW_{r-pF}	Energia relativa entre retenção de ar-água em escala logarítmica
ϕ	Porosidade total
ρ_b	Densidade do solo
h	Tensão matricial da água
θ	Umidade volumétrica
q	Densidade de fluxo da água no solo
∇h_{AB}	Gradiente hidráulico entre os pontos A e B definidos
α^*	Parâmetro para o método PCD
I	Infiltração acumulada
A	Taxa final de infiltração
S	Sorptividade
t	Tempo
Q	Vazão de água necessária para manter uma profundidade de água constante
H	Profundidade da água no furo
a	Raio do furo
C	Coefficiente da forma
Φ	Potencial de fluxo matricial
K_{fs}	Coefficiente de permeabilidade hidráulica do solo saturado medido em campo

r	Coeficiente de correlação de Pearson
ρ	Coeficiente de correlação de Spearman
ns	Não significativo
θ_{cc}	Umidade na capacidade de campo
θ_{pmp}	Umidade no ponto de murchamento permanente
θ_s	Umidade na saturação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	Estrutura do solo.....	14
2.2	Condutividade hidráulica do solo saturado (K_s).....	14
2.3	Qualidade física do solo	19
2.4	A curva de retenção de água no solo	21
2.5	Os índices hidráulico-energéticos do solo.....	24
3	OBJETIVO	27
3.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
4	MATERIAL E MÉTODOS	27
4.1	Granulometria, textura e classificação textural do solo	27
4.2	Banco de dados.....	28
4.3	Obtenção das curvas de retenção da água no solo	29
4.4	Cálculos dos índices hidráulico-energéticos do solo em escala numérica	30
4.5	Cálculos dos índices hidráulico-energéticos do solo em escala logarítmica.....	31
4.6	Correlações estatísticas	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1	Distribuição dos dados	35
5.2	Análises de correlação dos índices hidráulico-energéticos e K_s	36
6	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DE CORRELAÇÕES	68

1 INTRODUÇÃO

A agricultura tem papel importante na história, desenvolvendo-se paralelamente a sociedade. De acordo com Brevik e Hartemink (2010), na agricultura os solos são reconhecidos como recursos importantes para o cultivo de alimentos, fibras e combustível. Com os cultivos, foram encontradas diferenças nos tipos e nas propriedades do solo afetando o manejo das culturas agrícolas. Há evidências do uso de ferramentas para plantar e cobrir sementes no solo, de pelo menos 10 milênios pelos sumérios, além de outras civilizações (Lal *et al.*, 2007), mostrando o interesse humano em manejar, adaptar e analisar os solos às suas necessidades.

A análise da qualidade do solo deve levar em conta diversos aspectos como os processos físicos, químicos e biológicos. Especificamente, a análise da Qualidade Física do Solo (QFS) auxilia o exame da capacidade do solo em promover as condições físicas ideais para o crescimento e desenvolvimento dos vegetais. Mesmo que a análise da QFS seja uma análise qualitativa, os indicadores da QFS são importantes balizadores para quantificação e comparação do estado estrutural dos solos (Castellini *et al.*, 2019). De acordo com Turek *et al.* (2021), a porosidade total (ϕ), o coeficiente de permeabilidade hidráulica do solo saturado (K_s), a densidade do solo (ρ_b) e outras propriedades relacionadas a estrutura do solo são exemplos desses indicadores.

Os índices hidráulico-energéticos do solo também são exemplos de indicadores da QFS, por quantificarem a energia trabalhada para que o solo, por exemplo, armazene água na faixa disponível as plantas (Minasny e McBratney, 2003; Armindo e Wendroth, 2019). Tais índices são calculados a partir da integral da curva de retenção de água no solo (CRAS) (Rastgou *et al.*, 2020; Peters *et al.*, 2021), uma função hidráulica com ampla aplicação e que relaciona a umidade volumétrica (θ) e a tensão (h) matricial da água no solo. Os dados experimentais de $\theta(h)$ podem ser ajustados por diversas equações existentes na literatura (van Genuchten, 1980; Kosugi, 1996).

Assim, diversos indicadores como ϕ , ρ_b , K_s e os índices hidráulico-energéticos podem ser utilizados para uma análise mais ampla da QFS. O coeficiente K_s , que é uma constante de proporcionalidade entre a densidade de fluxo de água e o gradiente de potencial hidráulico, está presente em várias funções hidráulicas do solo, tornando-se uma propriedade edáfica fundamental nas aplicações hidrológicas, agronômicas, ambientais, etc. Essa propriedade hidráulica depende da forma e distribuição da geometria porosa do solo (Buttle e House, 1997), sendo, portanto, correlacionado com a estrutura do solo.

Por meio da literatura, há estudos que discorrem sobre a relação entre os processos físicos que fundamentam K_s e os índices hidráulico-energéticos do solo (Bacher *et al.*, 2018; dos Reis *et al.*, 2019; Armindo e Wendroth, 2016; Turek *et al.*, 2021; Weninger *et al.*, 2020). Entretanto, ainda não houve estudos que comprovassem a correlação estatística entre essas variáveis para que essa relação física fosse validada. Assim, neste trabalho, teve-se por objetivo descrever e investigar a correlação entre K_s e os índices hidráulico-energéticos do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Estrutura do solo

A estrutura do solo refere-se ao tamanho, forma e arranjo de sólidos e vazios em diferentes escalas sem considerar a heterogeneidade química da fase sólida (Rabot *et al.*, 2018). Segundo Bronick e Lal (2005) também se considera parte da estrutura do solo continuidade de poros, capacidade de reter e transmitir fluidos, substâncias orgânicas e inorgânicas. Uma estrutura favorável do solo é importante para melhorar a fertilidade do solo, aumentar a produtividade agrônômica.

De acordo com Rabot *et al.* (2018), a estrutura do solo é reconhecida para controlar muitos processos em solos. Regula a retenção e infiltração de água, trocas gasosas, matéria orgânica do solo e dinâmica de nutrientes, penetração radicular e suscetibilidade à erosão.

A estrutura do solo é discutida em relação ao meio ambiente, componentes biológicos do solo, propriedades do solo e práticas de manejo do solo com o intuito de melhor compreensão da dinâmica estrutural do solo (Bronick e Lal, 2005).

2.2 Condutividade hidráulica do solo saturado (K_s)

Darcy (1856) publicou o primeiro estudo a respeito da água em meios porosos definindo uma equação válida para o regime laminar de escoamento. No estudo, colunas de areia foram utilizadas com o intuito de obter maior entendimento sobre o processo de abastecimento de água em solos de Dijon, na França. Experimentalmente, K_s é uma constante de proporcionalidade, nomeada por coeficiente de permeabilidade do solo saturado, de acordo com a seguinte equação:

$$q = K_s \nabla h_{AB} \quad (1)$$

em que q é a densidade de fluxo da água no solo (m s^{-1}), ∇h_{AB} é o gradiente hidráulico entre os pontos A e B definidos (m m^{-1}) e K_s é o coeficiente de permeabilidade do solo saturado (m s^{-1}).

Gonçalves e Libardi (2013) descrevem a condutividade hidráulica do solo (K) como uma propriedade que indica a permeabilidade da água no solo. Quando ela atinge seu valor máximo, é designada como condutividade (ou permeabilidade) hidráulica do solo saturado (K_s). Quando K_s é atingido, a fração de água no solo se iguala à porosidade total, uma vez que teoricamente não há ar aprisionado no solo. De acordo com Rienzner e Gandolfi (2014), é um consenso entre os hidrologistas que K_s é um parâmetro fundamental na modelagem da dinâmica do fluxo de água, solutos e de energia nos solos.

K_s pode ser determinada com medições realizadas tanto em laboratório quanto em campo. Citam-se como métodos laboratoriais o método do permeâmetro de carga constante (PCC) e o do permeâmetro de carga decrescente (PCD) (Nijp *et al.*, 2017; Concialdi *et al.*, 2019).

O PCC é um instrumento amplamente utilizado para determinar K_s em condições de laboratório. Para isso, uma amostra de solo com estrutura preservada, coletada em um anel metálico, é utilizada. Para estabelecer uma diferença de potencial hidráulico, outro anel de mesmo diâmetro pode ser fixado em cima da amostra e preenchido com água. Assim, a água flui através da amostra e é coletada na sua extremidade inferior através de um sistema de tubos para uma saída. A diferença de carga hidráulica é mantida constante ao longo do tempo, por um fornecimento contínuo de água em combinação com uma saída de transbordamento. Em um sistema fechado, o excesso de água pode ser coletado e bombeado novamente para o topo da coluna de água. Para determinação mais precisa de K_s , a aplicabilidade do PCC é restrita a diferenças de cargas hidráulicas superiores a 0,01 m (ou seja, gradientes hidráulicos maiores que $0,1 \text{ m m}^{-1}$). Diferenças hidráulicas menores não podem ser determinadas com precisão (Nijp *et al.*, 2017).

O método PCD consiste em aplicar uma lâmina de água na superfície de um volume de solo confinado e, em seguida, medir o tempo para que a lâmina decresça de uma determinada altura. O método pode ser realizado tanto em campo quanto em colunas de solo em laboratório. A depender do método de obtenção de K_s em campo, uma estimativa independente do chamado parâmetro α^* com base nas características texturais e propriedades estruturais do solo é necessária. Esse parâmetro pode ser estimado por meio do monitoramento do nível de água durante a infiltração (Bagarello *et al.*, 2006; Concialdi *et al.*, 2019).

Como métodos de campo que podem ser utilizados para determinação de K_s citam-se: infiltrômetros de anéis concêntricos, permeâmetro de Guelph, infiltrômetros de tensão e demais métodos de infiltração, entre outros (Morbidelli *et al.*, 2017; Ibrahim e Aliyu, 2016).

De acordo com Morbidelli *et al.* (2017), a medição da infiltração com os infiltrômetros de anéis concêntricos (Figura 1) é realizada com dois anéis de aço sendo o interno com menor diâmetro e o externo com maior diâmetro. Os anéis são colocados no solo e preenchidos por água no mesmo nível, as medidas são realizadas no anel interno e a água delimitada pelo anel externo tem a finalidade de impedir que ocorra drenagem lateral de água no solo, de forma a criar um fluxo quase unidimensional sob o anel interno, onde a lâmina de água infiltrada e o tempo são medidos simultaneamente.

Uma vez que a saturação do solo é alcançada, a taxa de fluxo de água torna-se constante no tempo podendo ser utilizada para o cálculo de K_s por meio da solução simplificada de Philip (1957) (Morbidelli *et al.*, 2017). A solução geral de Philip (1957) da infiltração unidimensional sob a taxa de aplicação constante é descrita por uma série de potências convergentes da variável tempo. A equação a seguir é uma simplificação da série de Philip (1957) e contém os dois primeiros termos da solução:

$$I = At + St^{1/2} \quad (2)$$

em que I é a infiltração acumulada (mm), A é a taxa final de infiltração (mm/min), S é sorptividade ($\text{mm}/\text{min}^{1/2}$) e t é o tempo desde o início da infiltração (min).

De acordo com Gupta *et al.* (1993), o parâmetro A reflete a taxa de infiltração em estado estacionário na zona de umedecimento, enquanto S é interpretado como a lâmina de infiltração que ocorre nos estágios iniciais de infiltração. Ambos os parâmetros estão funcionalmente relacionados à K_s e são ajustados a partir de dados experimentais de $I(t)$. Os valores de A podem ser convertidos em estimativas de K_s usando um fator de multiplicação de 2/3 (Gupta *et al.*, 1993).

Figura 1 - Infiltrômetro de anéis concêntricos em campo.



Fonte: Viana *et al.*, 2015.

O permeâmetro de Guelph (Figura 2) é um dispositivo que inclui um tanque cheio de água e é inserido em um furo no solo. A lâmina de água, mantida constante no poço, proporciona um fluxo de água tridimensional (Reynolds e Elrick, 1985). O nível de água no tanque é medido em etapas sucessivas de tempo até que um fluxo constante e a saturação do solo sejam atingidos. Em seguida, para estimar K_s é necessário utilizar a solução analítica fornecida por Reynolds e Elrick (1985).

$$Q = \left(2\pi H^2 \frac{K_{fs}}{C} \right) + \pi a^2 K_{fs} + \left(2\pi H \frac{\Phi}{C} \right) \quad (3)$$

em que Q é a vazão de água necessária para manter uma profundidade de água constante (cm^3/min), H é a profundidade da água no furo (cm), a é o raio do furo (cm), C é o coeficiente da forma (parâmetro que representa a integral dos gradientes de pressão ao longo da superfície submersa do poço), $\infty\Phi$ é o potencial de fluxo matricial (cm^2/min) e K_{fs} é o coeficiente de permeabilidade hidráulica do solo saturado medido em campo. De acordo com Gupta *et al.* (1993), devido ao aprisionamento de ar, os valores de K_{fs} são geralmente inferiores à K_s , sendo necessário um fator multiplicador para conversão e que no estudo desses autores foi utilizado um fator de multiplicação igual a 2.

Figura 2 - Permeâmetro de Guelph instalado em campo.



Fonte: Barbosa, 2014.

Além de métodos laboratoriais, existem os modelos de previsão de K_s (geralmente são gerados de regressões de base de dados do solo já obtidos), como por exemplo as funções de pedotransferência (PTFs) (Araya e Ghezzehei, 2019; Zhang e Schaap, 2019; Bagarello *et al.*, 2017, 2019).

O termo função de pedotransferência foi introduzido por Bouma (1989) para descrever equações de propriedades hidráulicas do solo a partir de outras propriedades edáficas obtidas mais facilmente como, por exemplo, a densidade. O desenvolvimento de PTFs permite a

obtenção, por meio dos dados disponíveis, de informações necessárias sobre o solo, facilitando a análise da aplicação do fluxo de água, da transição energética e do transporte de soluto no campo, principalmente em grandes escalas (Zhang e Schaap, 2019).

De acordo com Tomasella *et al.* (2003), se as informações de retenção de água e os dados básicos do solo estiverem disponíveis para um conjunto de amostras, pode-se estimar a relação entre os parâmetros de uma equação de retenção de água e esses dados básicos. Como exemplo de predição de K_s pode-se citar o *software Splintex 2.0*, desenvolvido por Da Silva *et al.* (2020), que utiliza algumas propriedades físicas do solo para estimar K_s e os demais parâmetros da função condutividade hidráulica do solo não saturado.

Quando solo está saturado, uma das propriedades físicas que mais influencia K_s é a porosidade total, que varia de acordo com o local e orientação do solo, nas palavras de Gonçalves e Libardi (2013):

“A condutividade hidráulica do solo saturado descreve a funcionalidade de seu sistema poroso, englobando propriedades relacionadas com a sua porosidade, como quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros. Pelo fato de a condutividade hidráulica na condição saturada depender em grande parte da forma e continuidade do sistema poroso, essa varia fortemente de um local a outro, apresentando valores extremos em determinados locais e podendo diferir também nas distintas orientações do solo. (GONÇALVES e LIBARDI, 2013, pág. 1175)”

A condutividade hidráulica do solo saturado pode ser utilizada para caracterizar, interpretar e simular processos hidrológicos do solo, porém ela por si só não é suficiente. Outras variáveis, características e propriedades também são necessárias, como por exemplo, a temperatura, umidade relativa (Zhou *et al.*, 2014) e capacidade de campo (Aghakouchak e Habib, 2010).

Os valores que K_s pode assumir tem significados diferentes dependendo da textura e estrutura do solo avaliado, por exemplo, valores baixos de K_s são esperados para solos argilosos relativamente sem estrutura, enquanto altos valores de K_s podem ser esperados para solos argilosos bem estruturados e solos arenosos sem estrutura (Baiamonte *et al.*, 2017; Reynolds e Zebchuck, 1996).

De acordo com Sandin *et al.* (2017), o preparo do solo geralmente causa alterações nas propriedades estruturais e hidráulicas do solo influenciando o valor de K_s . Portanto, evidente é a dependência de K_s tanto a textura quanto a propriedades estruturais do solo (Neme *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2009; Gamie e De Smedt, 2017).

De acordo com Reynolds *et al.* (2003), K_s pode variar muito, e a faixa entre 0,03 e 0,3 cm min^{-1} é considerada ótima em relação às diferentes funções dos solos agrícolas. De acordo

com Soil Survey Staff (2017), K_s pode ser classificado como muito baixo para valores menores que $0,3 \mu\text{m/s}$, moderadamente baixo para valores entre $0,3$ e $1,2 \mu\text{m/s}$, moderadamente alto para valores entre $1,2$ e $4,8 \mu\text{m/s}$, alto para valores entre 15 e $30 \mu\text{m/s}$, e muito alto para valores maiores que $30 \mu\text{m/s}$.

Weninger *et al.* (2020), ao estudar amostras de solo argiloso, de uma região de transição entre a zona climática semiúmida da Europa Ocidental e a zona climática continental da Europa Oriental, com cultivo contínuo de cereais, notou que K_s segue uma distribuição log-normal. No trabalho, os autores analisaram 36 casos, nos quais 21 tiveram valores abaixo do limite crítico mínimo adotado para chuvas intensas de 15 minutos na região do projeto e anuidades T; sendo degradação média: $K_s < 206 \text{ cm d}^{-1}$ (T = 10 anos), degradação severa: $K_s < 85 \text{ cm d}^{-1}$ (T = 1 ano). Em particular, os tratamentos de plantio convencional e cultivo mínimo mostraram valores de K_s que, em alguns casos, estavam abaixo do limite nas profundidades superiores do solo, que são os principais determinantes para a sorptividade do solo. Os maiores valores de K_s em relação ao tratamento de preparo foram encontrados nas profundidades de 20-25 e 32-37 cm para plantio convencional (2 de 3 amostras) e 2-7 cm para plantio com preparo reduzido. De 12 amostras de solo extraídas de uma área de cultivo mínimo, 10 apresentaram valores medianos de K_s maiores que o limite inferior estabelecido para essa propriedade.

2.3 Qualidade física do solo

A análise da qualidade do solo é uma ferramenta eficaz para monitorar as funções desse meio poroso (Bacher *et al.*, 2021).

A definição da Qualidade Física do Solo (QFS) se baseia nas propriedades de transferência e armazenamento de massa e energia que ocorrem no solo. Essas propriedades se relacionam ao fornecimento de água, ar, nutrientes dissolvidos e calor apropriados para maximizar o desenvolvimento das raízes (Topp *et al.*, 1997).

Dessa forma, a QFS é um aspecto importante do solo que relaciona a capacidade dele em fornecer condições físicas adequadas para que as plantas possam se desenvolver nas melhores condições.

A QFS é frequentemente relacionada com a textura e estrutura do solo, avaliadas por meio de indicadores como a densidade, capacidade de armazenamento e de condução de ar, água, solutos e calor (Reynolds, 2017; Armindo e Wendroth, 2016). De acordo com Turek *et al.* (2021), muitos estudos avaliaram a estrutura do solo baseando-se em variáveis físicas, como, densidade do solo (ρ_b), porosidade total (ϕ), K_s , matéria orgânica (MO), entre outros. Vale a

pena ressaltar que a QFS está relacionada as condições químicas e biológicas do solo (Koureh *et al.*, 2019).

A QFS não é uma variável quantitativa para ser medida de forma direta, assim normalmente ela é avaliada por comparativos entre propriedades mensuradas e um conjunto de “parâmetros indicadores” que estabelecem intervalos ideais e valores críticos. Os indicadores podem ser utilizados na avaliação da sustentabilidade econômica e ambiental de práticas agrícolas, porque elas são responsáveis por mudanças, boas ou ruins, nos atributos físicos, químicos e biológicos de solos (Castellini *et al.*, 2019).

A estrutura do solo é diretamente ligada a QFS devido a relação com processos como infiltração de água, matéria orgânica, penetração das raízes, susceptibilidade a erosão, entre outros (Vogel *et al.*, 2018). Além disso, a estrutura é sensível ao longo do espaço e tempo a processos naturais (Bryk *et al.*, 2017) ou causados pela atividade humana, por exemplo, o cultivo agrícola (Nunes *et al.*, 2020). Assim, a análise estrutural do solo permite identificar as práticas que causam ou não impacto na QFS. Dessa forma, fração de água disponível para plantas, porosidade drenável, distribuição do tamanho dos poros e capacidade de campo relativa são exemplos de indicadores de QFS (Reynolds *et al.*, 2014; Reynolds, 2017).

Estudos recentes utilizam funções hidráulicas para calcular a QFS, por exemplo, Bacher *et al.* (2019) utiliza a CRAS e sua primeira derivada, a curva de distribuição de frequência dos tamanhos dos poros (CDFP) (Reynolds *et al.*, 2009). Como a CRAS e a CDFP são diretamente relacionadas a QFS, mudanças na estrutura do solo podem ser observadas tanto na CRAS quanto na CDFP. Assim, informações como ponto de saturação, capacidade de campo e de murchamento permanente, além dos índices de energia hidráulica do solo, água disponível para a planta, entre outros, podem ser indicadores de QFS extraídos da CRAS (Bacher *et al.*, 2019; Turek *et al.*, 2021).

De acordo com Costantini *et al.* (2016), cada indicador de QFS tem uma relevância e contribuição para o solo, e conseqüentemente para o ecossistema, como mostrado no quadro 1.

Quadro 1 - Relevância e contribuição de alguns indicadores QFS para o solo.

Indicador de QFS	Relevância para processos e funções do solo
Densidade do solo	Penetração da raiz da planta, porosidade, trocas gasosas
Capacidade de infiltração	Controle de escoamento / erosão, lixiviação
Capacidade de armazenamento de água	Retenção e transporte de água e produtos químicos
Profundidade efetiva do sistema radicular	Volume de enraizamento, habitat para fauna do solo

Fonte: Adaptado de Costantini *et al.* (2016).

De acordo com Armindo e Wendroth (2016), para avaliar a QFS, quatro premissas podem ser assumidas. Essas premissas apontam que (i) um solo cultivado deve ter níveis suficientes de ar e água para atender aos requisitos da planta e promover as trocas gasosas e de água entre a planta e a atmosfera, (ii) sistemas de drenagem devem promover a aeração do solo, (iii) um solo que sustenta uma floresta nativa pode ser assumido (ou flutuar em torno) como um padrão de qualidade física para efeitos de comparação, e (iv) efeitos da matéria orgânica e de resistência mecânica a penetração de raízes são manifestados na CRAS.

Ainda segundo Armindo e Wendroth (2016), mesmo com essas premissas, é difícil avaliar se a QFS é boa ou ruim por meio de um único índice, isso porque as condições de produção e a finalidade do uso do solo precisam ser levadas em consideração na avaliação. Por exemplo, nos estudos de Weninger *et al.* (2020), o efeito das operações de preparo do solo foi identificado a partir dos maiores resultados dos indicadores na parte inferior da camada trabalhada.

Koureh *et al.* (2019), ao estudar um solo argiloso não salino (Typic Haploxerepts) de uma região noroeste do Irã de clima semiárido, obteve valores entre 0,135 e 0,094 cm min^{-1} para K_s . Koureh *et al.* (2019) correlacionaram K_s e diferentes indicadores de QFS, como densidade do solo e água disponível para as plantas, por meio do coeficiente de correlação de Pearson (r). Os autores reportaram os seguintes resultados: 0,253^{ns} entre K_s e fração água disponível (AD) para planta, 0,466^{ns} entre K_s e o intervalo hídrico ótimo (IHO), 0,659 entre K_s e a capacidade integral de água e 0,804 entre K_s e a porosidade drenável (\emptyset).

2.4 A curva de retenção de água no solo

A curva de retenção de água no solo (CRAS) é formada por diversos pares de valores que indicam a umidade volumétrica e a tensão matricial da água no solo. Esses dados podem ser obtidos de forma experimental *in-situ* ou *ex-situ*. A CRAS pode ser representada por equações que mostram a capacidade do solo de reter água por meio de uma distribuição de tamanhos de poros e, dessa forma, propiciar uma interpretação mais distinta do estado físico-estrutural do solo do que, por exemplo, a densidade, que representa um valor discreto (Bacher *et al.*, 2021).

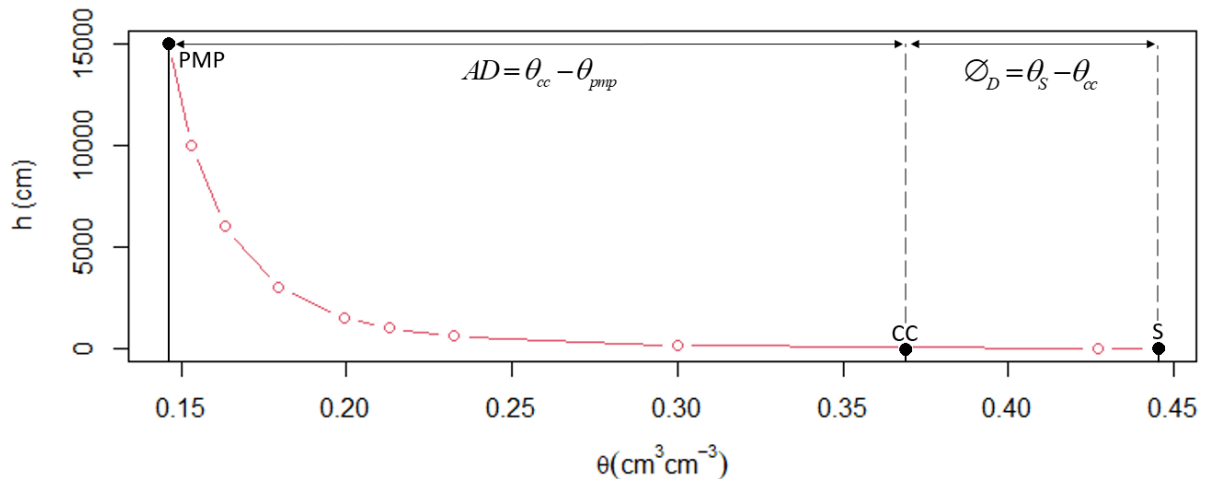
Em física do solo, há várias equações para a descrição da CRAS, como as de Brooks e Corey (1964), Gupta e Larson (1979), van Genuchten (1980) com a restrição de Mualem (1976).

Existem vários indicadores de QFS baseados nos parâmetros da CRAS, como a inclinação de uma tangente que passa pelo ponto de inflexão da CRAS (Dexter, 2004), em

alguns pontos chave da CFDP (Reynolds et al., 2009) ou utilizando toda a CRAS por meio de sua integral (Armando e Wendroth, 2016).

Uma vez que diversos indicadores de QFS são baseados nos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) com a restrição de Mualem (1976) (VGM), utilizou-se essa equação para o ajuste dos dados experimentais.

Figura 3 - Exemplo de uma CRAS.



A função retenção de água no solo $\theta(h)$ (umidade volumétrica do solo em função da tensão matricial) descrita pela CRAS, ou $h(\theta)$ (tensão matricial em função da umidade), é relacionada a estrutura do solo (Minasny e McBratney, 2003; Reynolds *et al.*, 2009; Armando e Wendroth, 2016). Dessa forma, informações sobre o armazenamento de água e sobre a estrutura do solo podem ser encontradas por meio da derivação ou integração da função $\theta(h)$. Por exemplo, a distribuição do volume de poros obtida por $d\theta/dh$ é constantemente utilizada para avaliar a QFS (Reynolds *et al.*, 2009).

Segundo Armando e Wendroth (2019), Mualem (1978) apresentou a integral da função $\theta(h)$, definida entre limites infinitos e zero de tensão matricial (h) para conceituar a energia ou o trabalho necessário para drenar um dado volume de solo saturado. Minasny e McBratney (2003) também integraram o modelo VGM, porém, os limites de 15000 e 100 cm foram utilizados para calcular a energia utilizada pelo solo para a retenção de água nessa faixa, definida como faixa de água disponível para a zona radicular das plantas. Dessa forma, a integral da função $\theta(h)$ contém informações que podem ser usadas para caracterizar a estrutura do solo.

Sabendo-se que a CRAS obtida *in situ* ou em laboratório, estudos buscam reduzir os custos para reduzir os custos de equipamentos tradicionais, estudos recentes buscam desenvolver novos experimentos e PTFs que associam as funções hidráulicas com propriedades

do solo facilmente mensuradas ou disponíveis em bancos de dados (Huf dos Reis *et al.*, 2018; Da Silva *et al.*, 2021). O método Beerkan é um exemplo para estimativa de parâmetros de transferência do solo (BEST) (Lassabatre *et al.*, 2006), que utiliza um experimento de infiltração no qual os parâmetros das funções CRAS e CDFP baseiam-se na textura do solo.

A CRAS possui pontos úteis, como por exemplo, a capacidade de campo (θ_{cc}) e o ponto de murchamento permanente (θ_{pmp}). Dentre as várias definições existentes, θ_{cc} pode ser definida como a umidade restante no campo dois ou três dias após o mesmo ter sido saturado, quando a drenagem interna se torna desprezível (Soil Survey Staff, 1999). θ_{cc} apresenta diversos métodos de obtenção e, conseqüentemente, divergências. Uma das maneiras de obtenção dessa variável se dá pelo critério dinâmico de fluxo (Turek *et al.*, 2018). Esse método leva em consideração o tempo e o gradiente hidráulico necessário para que a taxa de drenagem seja desprezível, em outras palavras, quando a mudança de θ ao longo do tempo tende a zero, $d\theta/dt \rightarrow 0$ (Prevedello, 1999). Richards e Weaver (1943) definiram o ponto de murchamento permanente (θ_{pmp}) como a umidade volumétrica de água restante em um solo sob pressão matricial a 15 bar, equivalente a 15000 *hPa*, experimentalmente encontrado em ensaios com o cultivo de girassol em vaso. Uma das formas de obter θ_{pmp} experimentalmente é por meio da câmara de pressão de Richards (Figura 4) (Grigolon *et al.*, 2020).

Figura 4 - Câmara de pressão de Richards.



Fonte: Criado e França, 2018.

Também na CRAS, temos duas faixas amplamente utilizadas, a fração água disponível (AD) para planta e a porosidade drenável (ϕ_D). AD se refere a lâmina de água que fica disponível para a planta absorver do solo, e fica situada entre o ponto de murchamento permanente (θ_{pmp}) e a capacidade de campo (θ_{cc}). Essa fração de água é relevante em diversos projetos, como os hidrológicos, de irrigação e drenagem e de manejo de recursos hídricos (Soil Survey Staff, 1999).

Já a variável ϕ_D é a umidade volumétrica do solo drenado pela ação do potencial gravitacional, e fica entre a umidade na saturação (θ_S) e a capacidade de campo (θ_{cc}) (White, 2006). ϕ_D relaciona-se com a aeração do solo, já que o espaço de água drenado será preenchido por ar, sendo importante indicador para o desenvolvimento da planta e para projetos de irrigação e drenagem.

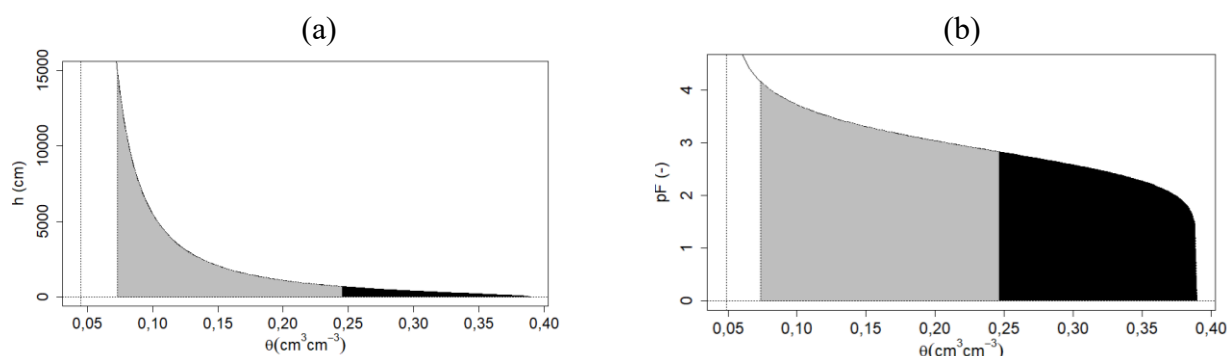
2.5 Os índices hidráulico-energéticos do solo

Os índices de energia hidráulica do solo, que são índices extraídos da CRAS, podem ser divididos em índices absolutos e relativos. A seguir será brevemente discorrido a respeito deles e, em capítulos posteriores, o processo de obtenção dos valores de cada um deles será mais detalhado.

Os índices absolutos correspondem a energia absoluta de aeração do solo (A_a) e a energia absoluta de retenção de água (WR_a). A_a representa a energia trabalhada pelo potencial gravitacional durante o processo de drenagem do solo. Nesse processo, o ar entra no sistema poroso e fica disponível para a respiração das raízes no solo (Armino e Wendroth, 2016). WR_a quantifica a energia total necessária para o solo armazenar a água na fração de água disponível para a planta. O limite entre A_a e WR_a é determinado pela umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) (Bacher *et al.*, 2020).

Já os índices relativos correspondem a energia relativa de aeração (A_r), a energia relativa de retenção de água (WR_r) e a energia relativa ar-água (AW_r) do solo. Esses índices tem valores percentuais e relacionam de diferentes formas os índices absolutos. A_r representa a área referente a energia de aeração do solo dividida pela área total proveniente da soma de A_a com WR_a . WR_r representa a razão da área de WR_a e a área compreendida entre a saturação e o ponto de murchamento permanente. Por fim, AW_r corresponde a razão entre as áreas referentes a A_a e WR_a (Figura 5a).

Figura 5 - Representação geométrica de uma curva de retenção de água no solo mostrando os índices hidráulico-energéticos absolutos de aeração (A_a), em preto, e retenção de água (WR_a), em cinza (a) e a representação da curva e dos índices em escala pF (b).



Fonte: do autor (2022).

Os cinco índices de energia hidráulica com base na integração da CRAS foram investigados por Armindo e Wendroth (2016) a fim de avaliar a QFS de solos de diferentes continentes. Os resultados encontrados foram diferenças na QFS manifestadas por meio do comportamento da estrutura do solo. Essas diferenças foram ocasionadas devido as variações de textura, manejo e uso do solo.

Weninger *et al.* (2020) ao analisar amostras de solo argiloso com processos de cultivos contínuos de cereais, verificaram que os dados de AW_r seguem distribuição log-normal. Os resultados da AW_r mostraram uma diminuição da QFS de 2-5 cm para 20-25 cm. Os tratamentos de conservação de lavouras reduzidas e lavouras mínimas apresentaram AW_r constante sobre a faixa de profundidade examinada com baixo grau de variabilidade. Uma avaliação qualitativa da QFS a partir de AW_r não foi realizada devido à falta de dados e limiares de referência. Contudo, Armindo e Wendroth (2016) ressaltam que os valores de referência devem ser investigados de acordo com o tipo, uso e manejo de interesse do solo.

Bacher *et al.* (2020) estudaram amostras de um solo de textura argilo-arenosa da Irlanda cujo uso destina-se a pastagem permanente e manejo intensivo. A amostragem foi dividida em dois grupos, um foi realizado com controle de limpeza de esterco no solo e o outro livre do controle de esterco, além disso, o solo apresentava abundância de minhocas. Resultados de A_a , A_r , WR_a , WR_r e AW_r foram calculados a partir de dados medidos ao longo de 27 semanas. Nessas semanas, as medições foram realizadas nas semanas 2, 7, 11 e 27. Os valores obtidos estão na tabela 1.

Tabela 1 - Índices hidráulico-energéticos obtidos por Bacher *et al.* (2020).

Semana	Tratamento de esterco	A_a	WR_a	A_r	WR_r	AW_r
		cm	cm^3	cm^{-3}	%	
2	Com controle	4,03	670	0,58	99,42	0,58
7	Com controle	5,81	704	0,80	99,20	0,80
11	Com controle	6,42	750	0,82	99,18	0,83
27	Com controle	2,27	564	0,48	99,52	0,48
2	Sem controle	4,05	663	0,59	99,41	0,59
7	Sem controle	6,87	738	0,91	99,09	0,92
11	Sem controle	10,88	782	1,34	98,66	1,36
27	Sem controle	5,21	739	0,68	99,32	0,69

Fonte: Adaptado de Bacher *et al.* (2020).

O valor de A_a calculado para o tratamento com controle de esterco (CE) ao longo do tempo numa faixa de 2,27-6,42 $cm\ cm^3\ cm^{-3}$ e 4,05-10,88 $cm\ cm^3\ cm^{-3}$ para tratamento sem controle de esterco (SCE). O valor de WR_a calculado mostrou intervalos de 564-670 e 663-782 $cm\ cm^3\ cm^{-3}$ para tratamento CE e SCE respectivamente. O aumento de A_a e WR_a durante a vida útil do esterco indicou que os solos aumentaram sua duração de disponibilidade de água para o consumo das plantas e drenagem, ou seja, o armazenamento de água foi estabilizado principalmente sob o tratamento SCE e a duração da drenagem diminuiu para o tratamento de CE. Os valores médios de AW_r calculados para o tratamento de CE ao longo do tempo mostraram variação entre 0,48-0,83. A princípio, não houve diferenças significativas em AW_r para os dois tratamentos. No entanto, AW_r mudou significativamente ao longo do tempo. Como AW_r é a razão entre A_a e WR_a , entende-se que mais energia é utilizada para a retenção de água do que para o processo de aeração. Após 27 semanas, para os solos sob tratamento CE, A_a , WR_a , A_r e AW_r caíram abaixo dos valores iniciais, sugerindo um efeito que superou a presença do esterco. Assim, os autores sugerem que as áreas sob CE atingiram a capacidade de campo mais cedo do que nos tratamentos SCE durante a drenagem. O indicador AW_r mostrou-se capaz de acompanhar mudanças sutis, mas significativas, na QFS em relação aos eventos amostrais. Para ambos os tratamentos de controle de esterco, AW_r seguiu tendência semelhante durante o experimento de amostragem após 2, 7 e 11 semanas. Tanto para o tratamento SCE quanto para CE, os valores de AW_r indicaram uma boa QFS (Bacher *et al.*, 2020).

Com base na literatura, percebe-se a importância em relacionar a QFS com diversos indicadores, entre eles K_s e os índices hidráulico-energéticos do solo (Bacher *et al.*, 2018; dos Reis *et al.*, 2019; Armindo e Wendroth, 2016; Turek *et al.*, 2021; Weninger *et al.*, 2020), porém ainda não há estudos que relacionam K_s com esses índices energéticos do solo sem a comprovação de que essas variáveis são correlacionáveis. Portanto, sugere-se tal investigação.

3 OBJETIVO

Verificar se há correlações lineares significativas entre a condutividade hidráulica do solo saturado e os índices hidráulico-energéticos obtidos em escala numérica e escala logarítmica.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Verificar se há correlações lineares significativas entre K_s e os índices AD, ϕ_D , A_a , WR_a , A_r , WR_r e AW_r .

Verificar se há correlações lineares significativas entre K_s e os índices AD_{pF} , ϕ_{D-pF} , A_{a-pF} , WR_{a-pF} , A_{r-pF} , WR_{r-pF} e AW_{r-pF} .

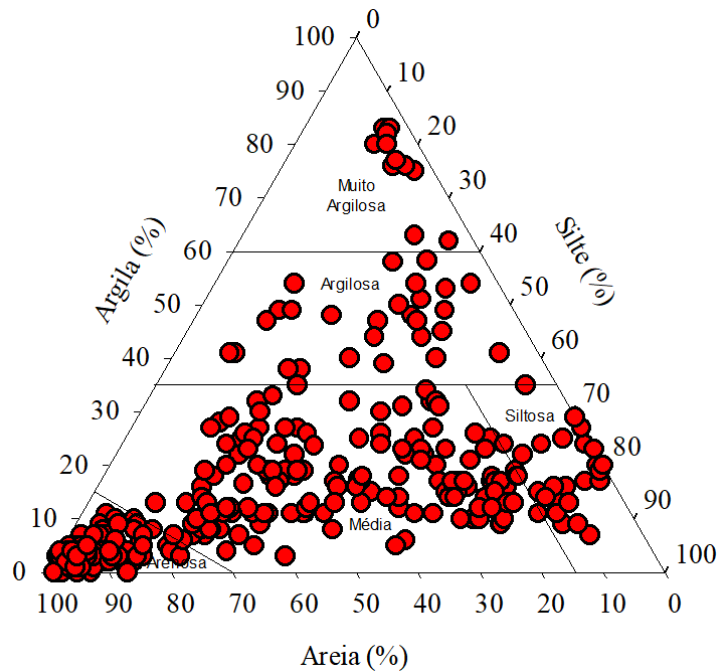
4 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado no Departamento de Física (DFI), do Instituto de Ciências Naturais (ICN), da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras – MG.

4.1 Granulometria, textura e classificação textural do solo

Para esse trabalho, a classificação textural foi realizada segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (Santos *et al.*, 2013). Nessa classificação, a argila é definida como partículas da fase sólida com diâmetro menor que 2 μm , o silte entre 2 e 50 μm e a areia com diâmetro maior que 50 μm e menor que 2000 μm . Por meio dessa classificação as classes texturais são definidas como: muito argilosa, classe com teor de argila maior que 600 g kg^{-1} ; argilosa, classe com teor de argila entre 350 e 600 g kg^{-1} ; siltosa, classe que contém menos de 350 g kg^{-1} de argila e menos de 150 g kg^{-1} de areia; e arenosa, classe onde o teor de areia é superior ao teor de argila em mais de 700 g kg^{-1} . Os demais intervalos compreendem a classe textural média (Figura 6).

Figura 6 - Triângulo textural de acordo com o SiBCS (Santos *et al.*, 2013) para as 395 amostras obtidas.



4.2 Banco de dados

Os dados das amostras presentes neste estudo foram retirados do banco de dados *Unsaturated soil database* versão 2.0 (UNSODA 2.0) (Nemes *et al.*, 2015), de artigos da área e cedidos por pesquisadores colaboradores, selecionando as informações de K_s , distribuição do tamanho das partículas e dados para a construção da CRAS. O número de amostras foi contabilizado e subdividido (Tabela 2) de acordo com a classe textural identificada seguindo o SiBCS (Santos *et al.*, 2013).

Tabela 2 - Distribuição das amostras de solo de acordo com sua classificação textural.

<i>Textura</i>	<i>Número de Amostras</i>
<i>Média</i>	147
<i>Arenosa</i>	96
<i>Argilosa</i>	61
<i>Muito Argilosa</i>	46
<i>Siltosa</i>	45
<i>Total</i>	395

Fonte: do autor (2022).

As amostras contidas nos bancos de dados para medição de K_s são provenientes de várias profundidades de vários estudos que utilizaram métodos diferentes, alguns dos métodos utilizados são o de PCC e PCD.

4.3 Obtenção das curvas de retenção da água no solo

Neste trabalho, os dados medidos de CRAS foram ajustados a equação de VGM. Nessa equação, a tensão matricial (h) é assumida como o valor absoluto do potencial matricial (ψ_m), expressando-a em unidades de energia por peso (valores positivos de altura ou comprimento). A equação de VGM pode ser descrita por:

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

em que θ é a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_s é a umidade na saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_r é a umidade residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), h é a tensão matricial ($h \geq 0$) (m), α (m^{-1}) e n são parâmetros de ajuste da curva. Comumente, $\theta(h)$ é uma função não linear, sendo que h varia entre 0 e 150 m.

A equação (4), apresentada por VGM, também pode ser escrita apresentando a tensão matricial (h) como a variável dependente da umidade volumétrica (θ) (Armindo e Wendroth, 2019):

$$h(\theta) = \alpha^{-1} \left\{ \left[\frac{(\theta_s - \theta_r)}{\theta - \theta_r} \right]^{\frac{n}{(n-1)}} - 1 \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

Quando escrita dessa forma, a equação (5) apresenta pontos importantes na análise da QFS, como a tensão matricial referente a capacidade de campo [$h(\theta_{cc})$] e referente ao ponto de murchamento permanente [$h(\theta_{pmp})$], geralmente definido como 150 m para o girassol.

De acordo com Armindo e Wendroth (2016, 2019), a função $\theta(h)$ pode ser dividida em duas frações: a de água disponível (AD) para planta e a porosidade drenável (ϕ_D), respectivamente apresentadas por:

$$AD = \theta_{cc} - \theta_{pmp} \quad (6)$$

$$\phi_D = \theta_s - \theta_{cc} \quad (7)$$

em que θ_{cc} é a umidade na capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_{pmp} é a umidade no ponto de murchamento permanente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), ϕ_D é a porosidade drenável ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e θ_s é a umidade na saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

As frações AD e ϕ_D são utilizadas no cálculo dos índices hidráulico-energéticos do solo como limites de integrais definidas.

Os dados de $h(\theta)$, textura e K_s foram retirados do UNSODA 2.0. Os dados de $h(\theta)$ foram utilizados para o ajuste das CRASs utilizando o *script* desenvolvido por Armindo e Wendroth

(2016) em *software* R (R Core Team, 2022). O *script* fornece como resultado os parâmetros da equação (5) para a curva de cada amostra de solo. Neste trabalho, optou-se por ajustar as CRAS que possuíam no mínimo 6 pares de valores medidos de $h(\theta)$.

4.4 Cálculos dos índices hidráulico-energéticos do solo em escala numérica

Neste tópico serão apresentadas as equações que foram utilizadas para calcular os índices hidráulico-energéticos do solo segundo Armindo e Wendroth (2016). Os índices são calculados em escala numérica para descrição da CRAS.

Energia absoluta de aeração do solo (A_a)

O índice A_a é calculado por meio da integração da função $h(\theta)$ de θ_S até o momento em que a taxa de drenagem se torne desprezível, ou seja, na capacidade de campo (θ_{cc}) (Armindo e Wendroth, 2016). Durante esta drenagem o ar penetra no solo preenchendo a faixa de \emptyset_D .

$$A_a = \int_{\theta_{cc}}^{\theta_S} h(\theta) d\theta \quad (8)$$

em que θ_{cc} é a umidade na capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_S é a umidade na saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ é a umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), h é a tensão matricial ($h \geq 0$) (cm).

Assim, A_a é o valor máximo obtido na função energética de aeração do solo, que pode ser utilizada para avaliar o sistema de poros do solo (dos Reis *et al.*, 2019).

Energia absoluta de retenção de água (WR_a)

Calcula-se o índice energético WR_a por meio da integração da função $h(\theta)$ no intervalo entre capacidade de campo (θ_{cc}) e o ponto de murchamento permanente (θ_{pmp}), como na equação:

$$WR_a = \int_{\theta_{pmp}}^{\theta_{cc}} h(\theta) d\theta \quad (9)$$

em que θ_{cc} é a umidade na capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{pmp} é a umidade no ponto de murchamento permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ é a umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), h é a tensão matricial ($h \geq 0$) (cm) e WR_a é a energia absoluta de aeração do solo ($\text{cm cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Energia relativa de aeração do solo (A_r)

A divisão da área referente a energia de aeração do solo pela área proveniente da soma de A_a com WR_a representa geometricamente a energia relativa de aeração do solo (A_r), e é mostrada a seguir:

$$A_r (\%) = 100 \left[\frac{A_a}{(A_a + WR_a)} \right] \quad (10)$$

Energia relativa de retenção de água (WR_r)

Calcula-se a energia relativa de retenção de água (WR_r) por meio da divisão de WR_a pelo total de energia utilizado de θ_S a θ_{pmp} , como descrito na seguinte equação:

$$WR_r (\%) = 100 \left[\frac{WR_a}{(A_a + WR_a)} \right] \quad (11)$$

Energia relativa entre retenção de ar-água (AW_r)

A energia relativa ar-água (AW_r) é obtida por meio da razão entre as energias absolutas de aeração e de retenção de água do solo, calculada por:

$$AW_r (\%) = 100 \left[\frac{A_a}{WR_a} \right] \quad (12)$$

Os cálculos dos índices energéticos (A_a , WR_a , A_r , WR_r e AW_r) apresentados foram realizados pelo *script* desenvolvido por Armindo e Wendroth (2016) em *software* R (R Core Team, 2022).

4.5 Cálculos dos índices hidráulico-energéticos do solo em escala logarítmica

A função $h(\theta)$ é uma função não-linear, graficamente mostrada na figura 5 (a), h possui valores de 0 a 15000 cm, já θ varia de 0 a 1 (Armindo e Wendroth, 2019). Essa diferença de escalas acarreta grandes valores de área para WR_a e ínfimos valores de área para A_a , e por consequência, obtém-se valores em WR_r próximos de 100% e valores em A_r e AW_r próximos de 0% (Armindo and Wendroth, 2019; Bacher *et al.*, 2021; Bacher *et al.*, 2019; dos Reis *et al.*, 2019). Desta forma, os três índices relativos (WR_r , A_r e AW_r) apresentam menor sensibilidade à variação da função $h(\theta)$ devido ao uso e manejo do solo. Por esse motivo, diferenças estruturais em alguns solos podem não ser significativamente detectadas evidenciando-se uma limitação na abordagem da QFS por meio dos índices relativos em escala numérica, apresentados nas equações (10, 11 e 12). Para tornar esses índices mais sensíveis na detecção de diferenças estruturais do solo, Armindo e Wendroth (2019) reescreveram a equação (4) em escala logarítmica, na forma $\theta(\log_{10}h)$:

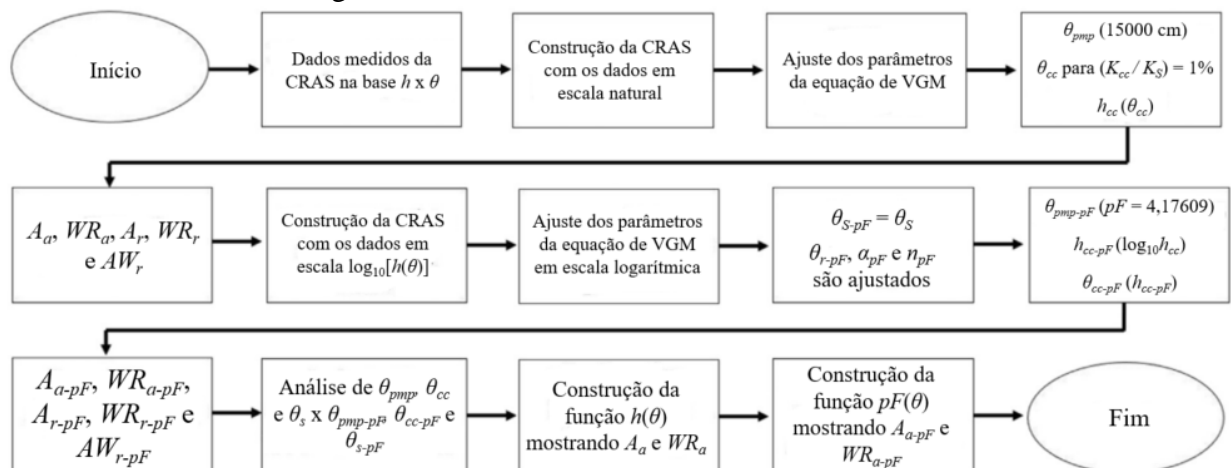
$$\theta(pF) = \theta_{r-pF} + \frac{\theta_{S-pF} - \theta_{r-pF}}{\left[1 + (\alpha_{pF} \cdot pF)^{n_{pF}}\right]^{1 - \frac{1}{n_{pF}}}} \quad (13)$$

O termo pF substitui a função $\log_{10}h$, ou seja, $pF = \log_{10}(h)$. Os demais parâmetros são os mesmos descritos na equação (4), porém obtidos em escala pF .

Bacher *et al.* (2021) concluíram que o cálculo dos índices em uma base pF fornece não só uma diferença visual (gráfica) (Figura 5b) como também uma diferença na ordem classificação dos solos ao aplicar, por exemplo, $WR_{\alpha-pF}$ em vez de WR_{α} , de forma a confirmar o que foi apresentado por Armindo e Wendroth (2019).

Essa transformação para base logarítmica traz dois aspectos negativos para os cálculos. O primeiro é que a função logarítmica quando aplicada em números reais entre 0 e 1 gera valores negativos, o que resultaria em uma área gráfica negativa para esse intervalo que subtrairia a energia integral dos índices absolutos. O segundo aspecto negativo é que os valores dos parâmetros ajustados por VGM são diferentes quando a função $\theta(\log_{10}h)$ ou $\log_{10}[h(\theta)]$ é usada, gerando diferentes limites de integração θ_S , θ_{pmp} e θ_{cc} e, por consequência, diferentes resultados das integrais definidas. Para solucionar esses aspectos negativos, Armindo e Wendroth (2019) apresentaram um fluxograma (Figura 2, Armindo e Wendroth, 2019), que foi adaptado e traduzido na próxima figura, onde $\theta_{S-pF} = \theta_S$ e θ_{pmp-pF} é calculado por $\log_{10}(15000 \text{ cm})$. O parâmetro θ_{cc-pF} é calculado por uma iteração numérica a partir do critério dinâmico utilizado para a capacidade de campo (Armindo e Wendroth, 2016) adaptada para a função logarítmica. Em todos os cálculos, h_{cc} deve ser maior que 1 cm para que a solução seja matematicamente real.

Figura 7 - Fluxograma que descreve o procedimento usado para calcular os índices de energia em uma base logarítmica.



Fonte: Adaptado de Armindo e Wendroth (2019).

Como na equação (13), as integrais que quantificam os índices de energia absoluta também foram modificadas para a escala logarítmica, tornando-se, segundo Armindo e Wendroth (2019):

$$A_{a-pF} = \int_{\theta_{cc-pF}}^{\theta_{S-pF}} pF(\theta) d\theta \quad (14)$$

$$WR_{a-pF} = \int_{\theta_{pmp-pF}}^{\theta_{cc-pF}} pF(\theta) d\theta \quad (15)$$

Por consequência, os índices relativos também foram reescritos na forma:

$$A_{r-pF} (\%) = 100 \left[\frac{A_{a-pF}}{(A_{a-pF} + WR_{a-pF})} \right] \quad (16)$$

$$WR_{r-pF} (\%) = 100 \left[\frac{WR_{a-pF}}{(A_{a-pF} + WR_{a-pF})} \right] \quad (17)$$

$$AW_{r-pF} (\%) = 100 \left[\frac{A_{a-pF}}{WR_{a-pF}} \right] \quad (18)$$

Os limites de integração θ_{S-pF} , θ_{pmp-pF} e θ_{cc-pF} apresentam o mesmo papel físico dos limites θ_S , θ_{pmp} e θ_{cc} apresentados nas equações (8) e (9), contudo eles foram obtidos na base pF .

A fim de analisar todas as investigações possíveis, foi aplicada a transformação logarítmica em todos os dados e também a soma dos índices absolutos ($A_a + WR_a$), além de ϕ_D , AD , A_a/ϕ_D e WR_a/AD , todos em escala numérica e pF . Também foi realizado o log da soma dos índices absolutos na escala numérica ($\log_{10}(A_a + WR_a)$), a soma dos índices absolutos em escala pF ($A_{a-pF} + WR_{a-pF}$) e a soma do log dos índices absolutos em escala numérica ($\log_{10}A_a + \log_{10}WR_a$).

4.6 Correlações estatísticas

As correlações entre as variáveis do presente estudo, K_s e os índices energéticos, foram quantificadas com os coeficientes de correlação paramétrica de Pearson (Huf dos Reis *et al.*, 2018; Moreno *et al.*, 2019; Nunes *et al.*, 2020) e o de correlação não-paramétrica de Spearman (De Souza, 2011; Masselink *et al.*, 2016; Teixeira *et al.*, 2021), valendo-se um ordenamento dos dados.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) descreve quão as variáveis são correlacionadas sob o aspecto da função linear. O coeficiente de correlação de Spearman (ρ)

avalia como a correlação entre duas variáveis pode ser descrita usando uma função monotônica, que pode ser ou não linear (De Winter *et al.*, 2016; Rebekić *et al.*, 2015).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (19)$$

em que r é o coeficiente de correlação de Pearson, X_i e Y_i são variáveis, \bar{X} e \bar{Y} são a média de X_i e Y_i respectivamente, n é o número total de observações.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{N(N^2 - 1)} \quad (20)$$

em que ρ é o coeficiente de correlação de Spearman, d_i é a diferença nas classificações dadas aos valores das duas variáveis para cada item dos dados e N é o número total de observações.

Em seguida as correlações foram classificadas. Os resultados de r podem ser linearmente positivos ou negativos e são classificados pelos seguintes intervalos: inexistente para valor igual a 0, fraca para $r \leq |0,1|$, moderada para $|0,3| < r \leq |0,7|$, forte para $r > |0,7|$ e perfeita para $r = |1,0|$ (Moreno *et al.*, 2019; Ratner, 2009).

Já os resultados de ρ também podem ser negativos ou positivos, e classificados pelos intervalos de ρ como: sem correlação para $\rho \leq |0,1|$, fraca para $|0,1| < \rho \leq |0,3|$, moderada $|0,3| < \rho \leq |0,7|$ e forte para $\rho > |0,7|$ (Teixeira *et al.*, 2021).

Com os resultados obtidos e com as devidas transformações construiu-se uma planilha para organização dos dados referentes a cada amostra.

Foram realizados teste de normalidade de Shapiro-Wilk (Cherubin *et al.*, 2016; Buttle e House, 1997; Dos Reis *et al.*, 2021) para todos os dados obtidos além das análises de correlação por meio do *software* R (R Core Team, 2022).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos cálculos dos dados das 395 amostras provenientes do UNSODA 2.0 (Nemes *et al.*, 2015) (76%), de Yu *et al.*, 2015 (5%) e cedidos por colaboradores (19%) estão disponíveis a seguir. Para os resultados apresentados vale destacar o “efeito método” nos dados utilizados, uma vez que diversas técnicas de medição foram utilizadas pelos autores da geração dos dados, contribuindo para não existência de padrão de medição dos dados das texturas agrupadas e, principalmente, dentro de cada separação textural.

5.1 Distribuição dos dados

Inicialmente, testou-se a normalidade dos dados de K_s uma vez que geralmente essa variável segue distribuição log-normal devido a variabilidade espacial e estrutural do solo (Mellantes *et al.*, 1997; Pachepsky e Park, 2015; Rezaei *et al.*, 2016; Gamie e De Smedt, 2017).

Por meio do teste, foi encontrado normalidade nas seguintes variáveis de acordo com as respectivas distribuições de frequência:

Quadro 2 – Distribuição de frequência dos índices e variáveis analisadas.

Separação Textural	Normalidade	Log-normalidade
Texturas agrupadas ($N = 395$)	$A_{a-pF} + WR_{a-pF}$	-
Média ($N = 147$)	WR_a WR_{a-pF} A_{a-pF}/ϕ_{D-pF} WR_{a-pF}/AD_{pF} $\log_{10}A_a + \log_{10}WR_a$ $A_{a-pF} + WR_{a-pF}$	K_s A_a
Arenosa ($N = 96$)	A_{a-pF} WR_{a-pF}/AD_{pF} $\log_{10}A_a + \log_{10}WR_a$	K_s
Argilosa ($N = 61$)	WR_a $A_{a-pF} + WR_{a-pF}$	K_s
Muito argilosa ($N = 46$)	WR_a WR_{a-pF} $A_{a-pF} + WR_{a-pF}$	K_s A_{a-pF}
Siltosa ($N = 45$)	ϕ_D ϕ_{D-pF} AD AD_{pF} WR_a WR_a/AD WR_{a-pF} A_{a-pF}/ϕ_{D-pF} WR_{a-pF}/AD_{pF} $A_a + WR_a$ $A_{a-pF} + WR_{a-pF}$	K_s A_a A_a/ϕ_D

Fonte: do autor (2022).

Como esperado, K_s apresentou log-normalidade em todas as separações texturais (Nemes *et al.*, 2005; Mellantes *et al.*, 1997; Pachepsky e Park, 2015; Rezaei *et al.*, 2016; Gamie e De Smedt, 2017), porém isso não foi observado para as texturas agrupadas. Dessa forma, estudos que avaliam a estrutura do solo em grandes áreas, onde pode haver grande variação textural, recomenda-se a análise de K_s por separação textural.

A mesma recomendação pode ser atribuída para WR_a para normalidade. Destaca-se que nas texturas média, muito argilosa e siltosa a normalidade foi encontrada para os índices na escala pF .

Os dois índices absolutos apresentaram distribuição normal ou log-normal para as texturas média, muito argilosa e siltosa. A normalidade de A_{a-pF} ressalta a importância de se utilizar os índices em escala pF (arenosa e muito argilosa). WR_a mostrou normalidade em 4 das 6 separações texturais avaliadas (média, argilosa, muito argilosa e siltosa), enquanto WR_{a-pF} em 3 das 4, o que indica que esse índice pode ser utilizado em ambas escalas.

As duas únicas texturas em que nem normalidade ou log-normalidade foram encontradas para os dois índices absolutos em ambas escalas abordadas foram argilosa e arenosa (Quadro 2).

A soma dos índices em escala pF não apresentou normalidade para textura arenosa, mas apresentou normalidade nas demais separações texturais e para as texturas agrupadas, valorizando a utilização da escala pF para os índices absolutos, corroborando com Armindo e Wendroth (2019). A soma dos \log_{10} dos índices também apresentou normalidade nas texturas média, arenosa e muito argilosa, sendo que nesta última os índices estão em escala pF . A soma dos índices absolutos, principalmente em escala pF , mostrou relevância para analisar a distribuição de frequência dos dados. Há um padrão na distribuição amostral para a soma dos índices em escala pF , já que das 6 separações texturais avaliadas, em 5 foi encontrada normalidade.

Weninger *et al.* (2020) encontraram log-normalidade de AW_r para um solo franco (Soil Survey Staff, 1999) da região do leste da Áustria, contudo para as amostras dos solos investigadas nesse estudo a distribuição log-normal não representou o comportamento de AW_r para nenhuma das separações texturais feitas.

Com base nos resultados de normalidade, apenas a soma dos índices absolutos na escala pF apresentou distribuição semelhante para as separações texturais avaliadas, sendo que a soma dos índices em escala numérica na textura arenosa segue log-normalidade. Apenas a soma dos índices $A_{a-pF} + WR_{a-pF}$ apresentou normalidade para as texturas agrupadas, o que confirma mais uma utilidade dos índices obtidos em escala pF .

Neste trabalho, não foi observada normalidade, nem log-normalidade, para os índices relativos.

5.2 Análises de correlação dos índices hidráulico-energéticos e K_s

As análises de estatística descritiva dos dados foram organizadas e descritas nas tabelas 3 a 8, sendo uma para as texturas agrupadas ($N = 395$) e uma para cada classificação textural.

Tabela 3 - Estatística descritiva dos resultados avaliados para as texturas agrupadas ($N = 395$).

<i>Índices</i>	<i>Unidade de Medida</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Média</i>	<i>Mediana</i>	<i>Máximo</i>	<i>DP</i>	<i>CV (%)</i>
K_s	cm/d	0	42,5	35	27648	33,3	78
$\log_{10}(K_s)$	-	-1,72	1,6	1,71	4,44	1,19	75
A_a	cm cm ³ cm ⁻³	0,005	13,89	1,7	980,16	76,51	551
WR_a		2,51	320,5	337,6	1042,8	208,4	65
$A_a + WR_a$		5,54	334,4	343,8	1483,5	228,3	68
$\log_{10}(A_a)$	-	-2,3	0,13	0,23	2,99	0,96	741
$\log_{10}(WR_a)$		0,4	2,26	2,53	3,02	0,64	28
$\log_{10}(A_a) + \log_{10}(WR_a)$		-0,12	2,39	2,3	5,69	1,04	44
$\log_{10}(A_a + WR_a)$		0,74	2,31	2,54	3,17	0,56	24
A_r	%	0,002	8,45	0,55	82,51	16,41	194
WR_r		17,49	91,55	99,45	99,99	16,41	18
AW_r		0,002	16,18	0,55	471,8	43,19	267
A_{a-pF}	$\log_{10}(cm)$ cm ³	0	0,13	0,09	0,64	0,12	95
WR_{a-pF}	cm ³	0,08	0,49	0,51	1,14	0,2	42
$A_{a-pF} + WR_{a-pF}$		0,16	0,62	0,62	1,24	0,19	31
A_{r-pF}	%	0	21,86	14,08	87,06	21,45	98
WR_{r-pF}		12,94	78,14	85,92	100	21,45	27
AW_{r-pF}		0	45,39	16,39	672,8	70,26	155
ϕ_D	cm ³ cm ⁻³	0,006	0,088	0,065	0,632	0,078	89
AD		0,020	0,187	0,189	0,473	0,078	42
ϕ_{D-pF}		0,002	0,102	0,072	0,640	0,108	106
AD_{pF}		-0,312	0,174	0,185	0,496	0,109	62
A_a/ϕ_D	cm	0,500	120,6	22,3	5958	527,6	438
WR_a/AD		27,37	1764	1640	13694	1553	88
A_{a-pF}/ϕ_{D-pF}	log(cm)	0,000	1,288	1,272	3,742	0,638	50
WR_{a-pF}/AD_{pF}		-2,42	2,47	2,61	4,14	0,939	38

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: do autor (2022).

Tabela 4 - Estatística descritiva dos resultados avaliados para textura média ($N = 147$).

<i>Índices</i>	<i>Unidade de Medida</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Média</i>	<i>Mediana</i>	<i>Máximo</i>	<i>DP</i>	<i>CV (%)</i>
K_s	cm/d	0,065	236,11	37,3	8380,8	898,39	380
$\log_{10}(K_s)$	-	-1,187	1,548	1,572	3,923	0,916	59
A_a	cm cm ³ cm ⁻³	0,005	9,27	1,25	223,27	23,91	258
WR_a		9	406,53	406,95	1042,78	178,45	44
$A_a + WR_a$		10,7	415,81	408,32	1266,05	186,58	45
$\log_{10}(A_a)$	-	-2,3	0,17	0,1	2,35	0,92	552
$\log_{10}(WR_a)$		0,95	2,54	2,61	3,02	0,32	13
$\log_{10}(A_a) + \log_{10}(WR_a)$		-0,12	2,7	2,59	5,37	0,99	37
$\log_{10}(A_a + WR_a)$		1,03	2,55	2,61	3,1	0,29	11
A_r	%	0,003	3,13	0,33	52,14	8,32	266
WR_r		47,86	96,87	99,67	99,997	8,32	9
AW_r		0,003	4,49	0,33	108,97	14,92	332
A_{a-pF}	$\log_{10}(\text{cm}) \text{ cm}^3$	0	0,11	0,07	0,52	0,11	97
WR_{a-pF}	cm ⁻³	0,08	0,57	0,57	1,14	0,19	34
$A_{a-pF} + WR_{a-pF}$		0,16	0,68	0,69	1,24	0,21	30
A_{r-pF}	%	0,076	15,58	10,22	69,03	14,75	95
WR_{r-pF}		30,97	84,42	89,78	99,92	14,75	18
AW_{r-pF}		0,076	24,35	11,38	222,94	36,05	148
ϕ_D	cm ³ cm ⁻³	0,006	0,067	0,061	0,248	0,047	70
AD		0,036	0,208	0,199	0,473	0,082	39
ϕ_{D-pF}		0,002	0,067	0,059	0,248	0,047	70
AD_{pF}		0,037	0,208	0,198	0,472	0,082	39
A_a/ϕ_D	cm	0,715	94	25	1359	188	201
WR_a/AD		133	2077	1842	6417	1019	49
A_{a-pF}/ϕ_{D-pF}	log(cm)	0,100	1,396	1,321	3,102	0,626	45
WR_{a-pF}/AD_{pF}		1,964	2,796	2,799	3,763	0,413	15

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: do autor (2022).

Tabela 5 - Estatística descritiva dos resultados avaliados para textura arenosa ($N = 96$).

<i>Índices</i>	<i>Unidade de Medida</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Média</i>	<i>Mediana</i>	<i>Máximo</i>	<i>DP</i>	<i>CV (%)</i>
K_s	cm/d	3	1060,88	420,33	27648	2946,28	277
$\log_{10}(K_s)$	-	0,47	2,49	2,62	4,44	0,73	29
A_a	cm cm ³ cm ⁻³	0,02	5,28	4,46	19,91	3,98	75
WR_a		2,51	74,88	17,54	455	106,74	142
$A_a + WR_a$		5,53	80,17	23,42	460	105,93	132
$\log_{10}(A_a)$	-	-1,7	0,56	0,64	1,29	0,46	82
$\log_{10}(WR_a)$		0,4	1,4	1,24	2,65	0,66	47
$\log_{10}(A_a) + \log_{10}(WR_a)$		0,7	1,97	1,93	3,56	0,65	33
$\log_{10}(A_a + WR_a)$		0,74	1,55	1,36	2,66	0,55	35
A_r	%	0,007	25,45	23,29	82,51	21,29	83
WR_r		17,49	74,54	76,7	99,993	21,29	28
AW_r		0,007	49,71	30,36	471,76	63,73	128
A_{a-pF}	$\log_{10}(cm) cm^3$	0,002	0,24	0,26	0,55	0,1	43
WR_{a-pF}	cm ⁻³	0,09	0,31	0,25	0,73	0,17	55
$A_{a-pF} + WR_{a-pF}$		0,23	0,55	0,54	1,13	0,16	29
A_{r-pF}	%	0,32	46,51	50,81	75,54	19,49	42
WR_{r-pF}		24,45	53,49	49,19	99,68	19,49	36
AW_{r-pF}		0,32	111,84	103,3	308,94	72,57	65
ϕ_D	cm ³ cm ⁻³	0,011	0,183	0,186	0,632	0,085	47
AD		0,044	0,145	0,115	0,369	0,073	50
ϕ_{D-pF}		0,008	0,182	0,187	0,590	0,081	45
AD_{pF}		0,044	0,147	0,117	0,387	0,074	50
A_a/ϕ_D	cm	1,103	28,917	23,198	111,305	19,95	69
WR_a/AD		27,372	382	149,4	1943	445,1	117
A_{a-pF}/ϕ_{D-pF}	log(cm)	0,240	1,322	1,333	1,968	0,315	24
WR_{a-pF}/AD_{pF}		1,310	2,061	2,007	2,929	0,333	16

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: do autor (2022).

Tabela 6 - Estatística descritiva dos resultados avaliados para textura argilosa ($N = 61$).

<i>Índices</i>	<i>Unidade de Medida</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Média</i>	<i>Mediana</i>	<i>Máximo</i>	<i>DP</i>	<i>CV (%)</i>
K_s	cm/d	0,02	380,94	3,97	7689,6	1291,42	339
$\log_{10}(K_s)$	-	-1,72	0,72	0,6	3,89	1,36	188
A_a	cm cm ³ cm ⁻³	0,009	34,31	0,21	980,16	149,87	437
WR_a		24,71	375,25	395,4	738,74	153,39	41
$A_a + WR_a$		25,73	409,56	398,02	1483,45	229,11	56
$\log_{10}(A_a)$	-	-2,06	-0,48	-0,68	2,99	1,17	-242
$\log_{10}(WR_a)$		1,39	2,52	2,6	2,87	0,24	10
$\log_{10}(A_a) + \log_{10}(WR_a)$		0,35	2,04	1,67	5,69	1,23	60
$\log_{10}(A_a + WR_a)$		1,41	2,55	2,6	3,17	0,26	10
A_r	%	0,002	3,82	0,05	66,07	12,8	335
WR_r		33,93	96,18	99,95	99,998	12,8	13
AW_r		0,002	8,06	0,05	194,75	32,27	400
A_{a-pF}	$\log_{10}(cm) cm^3$	0	0,06	0,02	0,64	0,11	183
WR_{a-pF}	cm ⁻³	0,13	0,5	0,54	0,76	0,17	34
$A_{a-pF} + WR_{a-pF}$		0,18	0,56	0,56	0,86	0,16	28
A_{r-pF}	%	0	10,64	3,59	77,06	17,79	167
WR_{r-pF}		22,939	89,361	96,407	100	17,791	20
AW_{r-pF}		0	23,56	3,73	335,95	63,49	270
ϕ_D	cm ³ cm ⁻³	0,011	0,183	0,186	0,632	0,085	47
AD		0,044	0,145	0,115	0,369	0,073	50
ϕ_{D-pF}		0,008	0,182	0,187	0,590	0,081	45
AD_{pF}		0,044	0,147	0,117	0,387	0,074	50
A_a/ϕ_D	cm	1,103	28,917	23,198	111,3	19,95	69
WR_a/AD		27,37	382,04	149,4	1943	445,14	117
A_{a-pF}/ϕ_{D-pF}	log(cm)	0,240	1,322	1,333	1,968	0,315	24
WR_{a-pF}/AD_{pF}		1,310	2,061	2,007	2,929	0,333	16

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: do autor (2022).

Tabela 7 - Estatística descritiva dos resultados avaliados para textura muito argilosa ($N = 46$).

<i>Índices</i>	<i>Unidade de Medida</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Média</i>	<i>Mediana</i>	<i>Máximo</i>	<i>DP</i>	<i>CV (%)</i>
K_s	cm/d	0,04	373,84	6,27	12960	1907,65	510
$\log_{10}(K_s)$	-	-1,43	0,87	0,8	4,11	1,29	149
A_a	cm cm ³ cm ⁻³	0,01	24,03	0,15	916,12	135,12	562
WR_a		16,97	375,16	381,59	805,94	184,72	49
$A_a + WR_a$		17,95	399,18	389,28	1189,44	226,1	57
$\log_{10}(A_a)$	-	-2,02	-0,51	-0,82	2,96	1,02	-198
$\log_{10}(WR_a)$		1,23	2,49	2,58	2,91	0,32	13
$\log_{10}(A_a) + \log_{10}(WR_a)$		0,32	1,98	1,68	5,4	1,12	56
$\log_{10}(A_a + WR_a)$		1,25	2,51	2,59	3,07	0,33	13
A_r	%	0,004	2,42	0,05	77,02	11,4	471
WR_r		22,98	97,58	99,95	99,996	11,398	12
AW_r		0,004	8,073	0,052	335,18	49,34	611
A_{a-pF}	$\log_{10}(\text{cm}) \text{ cm}^3$	0	0,05	0,02	0,56	0,09	192
WR_{a-pF}	cm ⁻³	0,08	0,48	0,5	0,85	0,16	34
$A_{a-pF} + WR_{a-pF}$		0,17	0,53	0,53	0,85	0,15	29
A_{r-pF}	%	0,02	8,93	3,8	87,06	14,71	165
WR_{r-pF}		12,94	91,07	96,2	100	14,71	16
AW_{r-pF}		0,02	23,39	3,95	672,84	98,7	422
ϕ_D	cm ³ cm ⁻³	0,010	0,031	0,021	0,154	0,024	80
AD		0,020	0,180	0,173	0,448	0,068	38
ϕ_{D-pF}		0,003	0,087	0,019	0,580	0,157	180
AD_{pF}		-0,312	0,125	0,169	0,496	0,169	135
A_a/ϕ_D	cm	0,605	206,003	9,420	5958	887	431
WR_a/AD		285,2	2398	1855	13694	2165,3	90
A_{a-pF}/ϕ_{D-pF}	log(cm)	0,002	0,881	0,841	3,652	0,633	72
WR_{a-pF}/AD_{pF}		-2,356	2,082	2,542	4,136	1,568	75

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: do autor (2022).

Tabela 8 - Estatística descritiva dos resultados avaliados para textura siltosa ($N = 45$).

<i>Índices</i>	<i>Unidade de Medida</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Média</i>	<i>Mediana</i>	<i>Máximo</i>	<i>DP</i>	<i>CV (%)</i>
K_s	cm/d	0,14	441,19	66	3010	767,75	174
$\log_{10}(K_s)$	-	-0,84	1,8	1,82	3,48	1,06	59
A_a	cm cm ³ cm ⁻³	0,03	9,29	4,48	78,8	15,61	168
WR_a		127,22	433,4	438,82	692,38	121,97	28
$A_a + WR_a$		127,25	442,68	441,92	711,39	125,37	28
$\log_{10}(A_a)$	-	-1,55	0,56	0,65	1,9	0,67	120
$\log_{10}(WR_a)$		2,11	2,62	2,64	2,84	0,14	5
$\log_{10}(A_a) + \log_{10}(WR_a)$		0,56	3,18	3,26	4,56	0,74	23
$\log_{10}(A_a + WR_a)$		2,11	2,63	2,65	2,85	0,14	5
A_r	%	0,02	1,98	1,04	14,76	3,07	155
WR_r		85,24	98,02	98,96	99,98	3,07	3
AW_r		0,02	2,13	1,05	17,31	3,53	166
A_{a-pF}	$\log_{10}(cm) cm^3$	0,004	0,15	0,13	0,36	0,09	64
WR_{a-pF}	cm ⁻³	0,2	0,6	0,62	0,93	0,13	21
$A_{a-pF} + WR_{a-pF}$		0,2	0,75	0,76	1,06	0,17	22
A_{r-pF}	%	16,54	10,15	45,81	45	0,56	219
WR_{r-pF}		54,19	81,77	83,46	97,81	10,15	12
AW_{r-pF}		2,24	24,46	19,82	84,52	18,21	75
ϕ_D	cm ³ cm ⁻³	0,008	0,081	0,079	0,156	0,038	47
AD		0,082	0,207	0,206	0,313	0,045	22
ϕ_{D-pF}		0,008	0,082	0,082	0,155	0,038	46
AD_{pF}		0,083	0,206	0,206	0,314	0,045	22
A_a/ϕ_D	cm	3,366	86,384	55,457	582	109	126
WR_a/AD		1189	2140,4	1976	3670,5	589	28
A_{a-pF}/ϕ_{D-pF}	log(cm)	0,575	1,625	1,633	2,680	0,415	26
WR_{a-pF}/AD_{pF}		2,402	2,941	2,937	3,453	0,228	8

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: do autor (2022).

Nas tabelas 9, 10, 11, 12, 13 e 14 são apresentadas as correlações de Pearson (r) e Spearman (ρ) entre os índices hidráulico-energéticos e K_s e as transformações para as texturas agrupadas ($N = 395$), divididas em textura média ($N = 147$), textura arenosa ($N = 96$), textura argilosa ($N = 61$), textura muito argilosa ($N = 46$) e textura siltosa ($N = 45$) respectivamente.

Tabela 9 – Correlações entre K_s e os índices hidráulico-energéticos para as texturas agrupadas ($N = 395$).

<i>Índice</i>	K_s	Classificação	$\log_{10}(K_s)$	Classificação
A_a	$r = -0,039$	<i>Fraca</i>	$r = -0,177^{***}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,148^{**}$	<i>Fraca</i>	$\rho = 0,148^{**}$	<i>Fraca</i>
WR_a	$r = -0,179^{***}$	<i>Fraca</i>	$r = -0,352^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,368^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,368^{***}$	<i>Moderada</i>
A_r	$r = 0,131^{**}$	<i>Fraca</i>	$r = 0,216^{***}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,325^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = 0,325^{***}$	<i>Moderada</i>
WR_r	$r = -0,131^{**}$	<i>Fraca</i>	$r = -0,215^{***}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,325^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,325^{***}$	<i>Moderada</i>
AW_r	$r = 0,075$	<i>Fraca</i>	$r = 0,139^{**}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,325^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = 0,325^{***}$	<i>Moderada</i>
$\log_{10}A_a$	$r = 0,008^{**}$	<i>Fraca</i>	$r = 0,128^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,148$	<i>Fraca</i>	$\rho = 0,148^{**}$	<i>Fraca</i>
$\log_{10}WR_a$	$r = -0,238^{***}$	<i>Fraca</i>	$r = -0,414^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,368^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,368^{***}$	<i>Moderada</i>
$A_a + WR_a$	$r = -0,177^{***}$	<i>Fraca</i>	$r = -0,381^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,385^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,385^{***}$	<i>Moderada</i>
$\log_{10}(A_a + WR_a)$	$r = -0,249^{***}$	<i>Fraca</i>	$r = -0,433^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,385^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,385^{***}$	<i>Moderada</i>
$\log_{10}A_a + \log_{10}WR_a$	$r = -0,138^{**}$	<i>Fraca</i>	$r = -0,135^{**}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,115^*$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,115^*$	<i>Fraca</i>
A_{a-pF}	$r = 0,061$	<i>Fraca</i>	$r = 0,262^{***}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,347^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = 0,347^{***}$	<i>Moderada</i>
WR_{a-pF}	$r = -0,074$	<i>Fraca</i>	$r = -0,071$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,085$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = -0,085$	<i>Sem correlação</i>
A_{r-pF}	$r = 0,140^{**}$	<i>Fraca</i>	$r = 0,289^{***}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,352^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = 0,352^{***}$	<i>Moderada</i>
WR_{r-pF}	$r = -0,140^{**}$	<i>Fraca</i>	$r = -0,287^{***}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,352^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,352^{***}$	<i>Moderada</i>
AW_{r-pF}	$r = 0,104^*$	<i>Fraca</i>	$r = 0,178^{***}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,352^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = 0,352^{***}$	<i>Moderada</i>
$A_{a-pF} + WR_{a-pF}$	$r = -0,038$	<i>Fraca</i>	$r = 0,093$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,067$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,067$	<i>Sem correlação</i>

***: significativo para P -valor $< 0,1\%$, **: significativo para P -valor $< 1,0\%$, *: significativo para P -valor $< 5,0\%$, outros valores: não significativos.

Fonte: do autor (2022).

Tabela 10 – Correlações entre K_s e os índices hidráulico-energéticos para as amostras de textura média ($N = 147$).

<i>Índice</i>	K_s	Classificação	$\log_{10}(K_s)$	Classificação
A_a	$r = -0,057$	<i>Fraca</i>	$r = -0,077$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,103$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,103$	<i>Fraca</i>
WR_a	$r = -0,057$	<i>Fraca</i>	$r = 0,127$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,172^*$	<i>Fraca</i>	$\rho = 0,172^*$	<i>Fraca</i>
A_r	$r = -0,044$	<i>Fraca</i>	$r = -0,105$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,123$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,123$	<i>Fraca</i>
WR_r	$r = 0,044$	<i>Fraca</i>	$r = 0,104$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,123$	<i>Fraca</i>	$\rho = 0,123$	<i>Fraca</i>
AW_r	$r = -0,039$	<i>Fraca</i>	$r = -0,111$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,123$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,123$	<i>Fraca</i>
$\log_{10}A_a$	$r = -0,043$	<i>Fraca</i>	$r = -0,049$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,103$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,103$	<i>Fraca</i>
$\log_{10}WR_a$	$r = -0,018$	<i>Fraca</i>	$r = 0,103$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,172^*$	<i>Fraca</i>	$\rho = 0,172^*$	<i>Fraca</i>
$A_a + WR_a$	$r = -0,062$	<i>Fraca</i>	$r = 0,111$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,163^*$	<i>Fraca</i>	$\rho = 0,163^*$	<i>Fraca</i>
$\log_{10}(A_a + WR_a)$	$r = -0,026$	<i>Fraca</i>	$r = 0,095^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,163^*$	<i>Fraca</i>	$\rho = 0,163$	<i>Fraca</i>
$\log_{10}A_a + \log_{10}WR_a$	$r = -0,045$	<i>Fraca</i>	$r = -0,012$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,064$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = -0,064$	<i>Sem correlação</i>
A_{a-pF}	$r = -0,003$	<i>Fraca</i>	$r = 0,038$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,028$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,028$	<i>Sem correlação</i>
WR_{a-pF}	$r = 0,174^*$	<i>Fraca</i>	$r = 0,456^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = 0,422^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = 0,422^{***}$	<i>Moderada</i>
A_{r-pF}	$r = -0,039$	<i>Fraca</i>	$r = -0,078$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,028$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = -0,085$	<i>Sem correlação</i>
WR_{r-pF}	$r = 0,039$	<i>Fraca</i>	$r = 0,078$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,085$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,085$	<i>Sem correlação</i>
AW_{r-pF}	$r = -0,043$	<i>Fraca</i>	$r = -0,099$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,085$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = -0,085$	<i>Sem correlação</i>
$A_{a-pF} + WR_{a-pF}$	$r = 0,159$	<i>Fraca</i>	$r = 0,441^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = 0,395^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = 0,395^{***}$	<i>Moderada</i>

***: significativo para P -valor $< 0,1\%$, **: significativo para P -valor $< 1,0\%$, *: significativo para P -valor $< 5,0\%$, outros valores: não significativos.

Fonte: do autor (2022).

Tabela 11 - Correlações entre K_s e os índices hidráulico-energéticos para as amostras de textura arenosa ($N = 96$).

<i>Índice</i>	K_s	Classificação	$\log_{10}(K_s)$	Classificação
A_a	$r = -0,180$	<i>Fraca</i>	$r = -0,262^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,327^{**}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,327^{**}$	<i>Moderada</i>
WR_a	$r = -0,163$	<i>Fraca</i>	$r = -0,407^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,444^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,444^{***}$	<i>Moderada</i>
A_r	$r = 0,084$	<i>Fraca</i>	$r = 0,222^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,213^*$	<i>Fraca</i>	$\rho = 0,213^*$	<i>Fraca</i>
WR_r	$r = -0,085$	<i>Fraca</i>	$r = 0,222^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,213^*$	<i>Fraca</i>	$\rho = 0,213^*$	<i>Fraca</i>
AW_r	$r = 0,017$	<i>Fraca</i>	$r = 0,126$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,213^*$	<i>Fraca</i>	$\rho = 0,213^*$	<i>Fraca</i>
$\log_{10}A_a$	$r = -0,094$	<i>Fraca</i>	$r = -0,123$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,327$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,327^{**}$	<i>Moderada</i>
$\log_{10}WR_a$	$r = -0,229^{***}$	<i>Fraca</i>	$r = -0,414^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,444^{**}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,444^{***}$	<i>Moderada</i>
$A_a + WR_a$	$r = -0,171$	<i>Fraca</i>	$r = -0,420^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,516^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,515^{***}$	<i>Moderada</i>
$\log_{10}(A_a + WR_a)$	$r = -0,261^*$	<i>Fraca</i>	$r = -0,450^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,516^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,516^{***}$	<i>Moderada</i>
$\log_{10}A_a + \log_{10}WR_a$	$r = -0,303^{**}$	<i>Moderada</i>	$r = -0,513^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,548^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,548^{***}$	<i>Moderada</i>
A_{a-pF}	$r = -0,074$	<i>Fraca</i>	$r = 0,113$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,039$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,037$	<i>Sem correlação</i>
WR_{a-pF}	$r = -0,176$	<i>Fraca</i>	$r = -0,238^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,222^*$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,222^*$	<i>Fraca</i>
A_{r-pF}	$r = 0,101$	<i>Fraca</i>	$r = 0,217^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,039$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,189$	<i>Fraca</i>
WR_{r-pF}	$r = -0,101$	<i>Fraca</i>	$r = -0,217^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,189$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,189$	<i>Fraca</i>
AW_{r-pF}	$r = 0,062$	<i>Fraca</i>	$r = 0,184$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,189$	<i>Fraca</i>	$\rho = 0,189$	<i>Fraca</i>
$A_{a-pF} + WR_{a-pF}$	$r = -0,233$	<i>Fraca</i>	$r = -0,178$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,246^*$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,246^*$	<i>Fraca</i>

***: significativo para P -valor $< 0,1\%$, **: significativo para P -valor $< 1,0\%$, *: significativo para P -valor $< 5,0\%$, outros valores: não significativos.

Fonte: do autor (2022).

Tabela 12 - Correlações entre K_s e os índices hidráulico-energéticos para as amostras de textura argilosa ($N = 61$).

<i>Índice</i>	K_s	Classificação	$\log_{10}(K_s)$	Classificação
A_a	$r = -0,065$	<i>Fraca</i>	$r = -0,215$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,031$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = -0,031$	<i>Sem correlação</i>
WR_a	$r = -0,133$	<i>Fraca</i>	$r = -0,142$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,161$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,161$	<i>Fraca</i>
A_r	$r = -0,076$	<i>Fraca</i>	$r = -0,312^*$	<i>Moderada</i>
	$\rho = 0,063$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,063$	<i>Sem correlação</i>
WR_r	$r = 0,076$	<i>Fraca</i>	$r = 0,312^*$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,063$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = -0,063$	<i>Sem correlação</i>
AW_r	$r = -0,069$	<i>Fraca</i>	$r = -0,254^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,063$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,063$	<i>Sem correlação</i>
$\log_{10}A_a$	$r = 0,124$	<i>Fraca</i>	$r = -0,120$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,031$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = -0,031$	<i>Sem correlação</i>
$\log_{10}WR_a$	$r = -0,154$	<i>Fraca</i>	$r = -0,220$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,161$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,161$	<i>Fraca</i>
A_a+WR_a	$r = -0,131$	<i>Fraca</i>	$r = -0,236$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,236$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,236$	<i>Fraca</i>
$\log_{10}(A_a+WR_a)$	$r = -0,167$	<i>Fraca</i>	$r = -0,295^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,236$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,236$	<i>Fraca</i>
$\log_{10}A_a+ \log_{10}WR_a$	$r = 0,087$	<i>Fraca</i>	$r = -0,157$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,102$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,102$	<i>Fraca</i>
A_{a-pF}	$r = 0,111$	<i>Fraca</i>	$r = -0,152$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,041$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,041$	<i>Sem correlação</i>
WR_{a-pF}	$r = 0,137$	<i>Fraca</i>	$r = 0,168^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,112$	<i>Fraca</i>	$\rho = 0,112$	<i>Fraca</i>
A_{r-pF}	$r = 0,057$	<i>Fraca</i>	$r = -0,227$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,070$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,069$	<i>Sem correlação</i>
WR_{r-pF}	$r = -0,057$	<i>Fraca</i>	$r = 0,227$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,069$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,069$	<i>Sem correlação</i>
AW_{r-pF}	$r = -0,031$	<i>Fraca</i>	$r = -0,274$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,070$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,069$	<i>Sem correlação</i>
$A_{a-pF} + WR_{a-pF}$	$r = 0,225$	<i>Fraca</i>	$r = 0,076$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,041$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,041$	<i>Fraca</i>

***: significativo para P -valor $< 0,1\%$, **: significativo para P -valor $< 1,0\%$, *: significativo para P -valor $< 5,0\%$, outros valores: não significativos.

Fonte: do autor (2022).

Tabela 13 - Correlações entre K_s e os índices hidráulico-energéticos para as amostras de textura muito argilosa ($N = 46$).

<i>Índice</i>	K_s	Classificação	$\log_{10}(K_s)$	Classificação
A_a	$r = -0,035$	<i>Fraca</i>	$r = -0,138$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,154$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,154$	<i>Fraca</i>
WR_a	$r = -0,000$	<i>Fraca</i>	$r = -0,523^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,580^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,580^{***}$	<i>Moderada</i>
A_r	$r = -0,040$	<i>Fraca</i>	$r = -0,126$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,032$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = -0,032$	<i>Sem correlação</i>
WR_r	$r = 0,040$	<i>Fraca</i>	$r = 0,126$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,032$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,033$	<i>Sem correlação</i>
AW_r	$r = -0,032$	<i>Fraca</i>	$r = -0,122$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,032$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = -0,032$	<i>Sem correlação</i>
$\log_{10}A_a$	$r = -0,146$	<i>Fraca</i>	$r = -0,225$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,154$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,154$	<i>Fraca</i>
$\log_{10}WR_a$	$r = 0,029$	<i>Fraca</i>	$r = -0,478^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,580^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,580^{***}$	<i>Moderada</i>
$A_a + WR_a$	$r = -0,021$	<i>Fraca</i>	$r = -0,510^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,601^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,601^{***}$	<i>Moderada</i>
$\log_{10}(A_a + WR_a)$	$r = 0,018$	<i>Fraca</i>	$r = -0,498^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,601^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,601^{***}$	<i>Moderada</i>
$\log_{10}A_a + \log_{10}WR_a$	$r = -0,125$	<i>Fraca</i>	$r = -0,343^*$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,374^*$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,374^*$	<i>Moderada</i>
A_{a-pF}	$r = -0,085$	<i>Fraca</i>	$r = -0,177$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,137$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,137$	<i>Fraca</i>
WR_{a-pF}	$r = 0,321^*$	<i>Moderada</i>	$r = -0,279$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,422^{**}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,422^{**}$	<i>Moderada</i>
A_{r-pF}	$r = -0,091$	<i>Fraca</i>	$r = -0,048$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,033$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = -0,033$	<i>Sem correlação</i>
WR_{r-pF}	$r = 0,091$	<i>Fraca</i>	$r = 0,048$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,033$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,033$	<i>Sem correlação</i>
AW_{r-pF}	$r = -0,042$	<i>Fraca</i>	$r = -0,108$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,033$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = -0,033$	<i>Sem correlação</i>
$A_{a-pF} + WR_{a-pF}$	$r = 0,293^*$	<i>Fraca</i>	$r = -0,401^{**}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,513^{***}$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,513^{***}$	<i>Moderada</i>

***: significativo para P -valor $< 0,1\%$, **: significativo para P -valor $< 1,0\%$, *: significativo para P -valor $< 5,0\%$, outros valores: não significativos.

Fonte: do autor (2022).

Tabela 14 - Correlações entre K_s e os índices hidráulico-energéticos para as amostras de textura siltosa ($N = 45$).

<i>Índice</i>	K_s	Classificação	$\log_{10}(K_s)$	Classificação
A_a	$r = -0,206$	<i>Fraca</i>	$r = -0,209$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,128$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,128$	<i>Fraca</i>
WR_a	$r = -0,278$	<i>Fraca</i>	$r = -0,287$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,304^*$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,304^*$	<i>Moderada</i>
A_r	$r = -0,203$	<i>Fraca</i>	$r = -0,203$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,048$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = -0,048$	<i>Sem correlação</i>
WR_r	$r = 0,203$	<i>Fraca</i>	$r = 0,203$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,048$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,048$	<i>Sem correlação</i>
AW_r	$r = -0,198$	<i>Fraca</i>	$r = -0,206$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,048$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = -0,048$	<i>Sem correlação</i>
$\log_{10}A_a$	$r = -0,198$	<i>Fraca</i>	$r = -0,090$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,128$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,128$	<i>Fraca</i>
$\log_{10}WR_a$	$r = -0,242$	<i>Fraca</i>	$r = -0,259$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,304^*$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,304^*$	<i>Moderada</i>
$A_a + WR_a$	$r = -0,296^*$	<i>Fraca</i>	$r = -0,305^*$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,330^*$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,330^*$	<i>Moderada</i>
$\log_{10}(A_a + WR_a)$	$r = -0,260$	<i>Fraca</i>	$r = -0,278$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,330^*$	<i>Moderada</i>	$\rho = -0,330^*$	<i>Moderada</i>
$\log_{10}A_a + \log_{10}WR_a$	$r = -0,224$	<i>Fraca</i>	$r = -0,130$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,212$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,211$	<i>Moderada</i>
A_{a-pF}	$r = -0,166$	<i>Fraca</i>	$r = -0,087$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,010$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = -0,010$	<i>Sem correlação</i>
WR_{a-pF}	$r = 0,033$	<i>Fraca</i>	$r = -0,006$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,040$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,040$	<i>Sem correlação</i>
A_{r-pF}	$r = -0,151$	<i>Fraca</i>	$r = -0,062$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,010$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,005$	<i>Sem correlação</i>
WR_{r-pF}	$r = 0,151$	<i>Fraca</i>	$r = 0,062$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,005$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,005$	<i>Sem correlação</i>
AW_{r-pF}	$r = -0,170$	<i>Fraca</i>	$r = -0,115$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,005$	<i>Sem correlação</i>	$\rho = 0,005$	<i>Sem correlação</i>
$A_{a-pF} + WR_{a-pF}$	$r = -0,068$	<i>Fraca</i>	$r = -0,053$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,106$	<i>Fraca</i>	$\rho = -0,105$	<i>Fraca</i>

***: significativo para P -valor $< 0,1\%$, **: significativo para P -valor $< 1,0\%$, *: significativo para P -valor $< 5,0\%$, outros valores: não significativos.

Fonte: do autor (2022).

A_a apresentou correlação negativa moderada com K_s e $\log(K_s)$ apenas para a classificação textural arenosa e correlação fraca para as texturas agrupadas, sendo que nos dados gerais destaca-se a correlação para o índice em escala pF , mostrando mais uma importância dessa escala para os índices descritos por Armindo e Wendroth (2019). A_a também apresenta correlação com outros parâmetros do solo. Dos Reis *et al.* (2019) analisaram duas profundidades (0–10 e 10–20 cm) de um Latossolo Bruno em sistema integrado de produção agropecuária (ICLS) e em quatro sistemas de preparo: preparo convencional (CT), preparo

mínimo (MT), plantio direto (NT) e plantio direto escarificado (CNT), levando em consideração o azevém anual cultivado durante o inverno para uso em pastejo (G) e silagem (S). Foram encontrados os maiores valores de A_a nas amostras da camada superior para MT/S. Também foram encontradas fortes correlações destacadas pelo coeficiente de Pearson entre A_a e diâmetro mediano do poro ($d_{mediana}$) ($r = 0,882$, $P\text{-valor} = 6,2 \times 10^{-6}$), A_a e o diâmetro médio do poro ($d_{média}$) ($r = 0,973$, $P\text{-valor} = 2,82 \times 10^{-10}$) e A_a e assimetria ($r = 0,946$, $P\text{-valor} = 3,31 \times 10^{-8}$), o que indica que o índice A_a se correlacionou significativamente com os parâmetros da função de distribuição do tamanho dos poros e, por consequência, com a drenagem do solo, complementando as informações sobre a QFS. Para índice A_a esperava-se um número maior de correlações significativas com $\log(K_s)$ na escala pF , visto que nesta escala o índice apresenta valores mais expressivos de WR_a que na escala numérica, porém isso só ocorreu para as texturas agrupadas. Na escala numérica observaram-se correlações significativas entre A_a e $\log(K_s)$ nas texturas agrupadas (embora menor que na escala pF , que também teve resultado significativo) e na textura arenosa. O resultado de A_a ao se correlacionar significativamente com $\log(K_s)$ para a textura arenosa confirmou a hipótese, devido a forma de cadeia da CRAS e por essa textura apresentar os maiores valores de A_a .

A condutividade hidráulica e WR_a tiveram correlações de Spearman significativas em 5 das 6 separações analisadas, sendo 4 dessas 5 correlações significativas moderadas, e as mais acentuadas a textura muito argilosa e arenosa, o que significa que WR_a em relação ao $\log(K_s)$ possuem correlação monotônica, sendo que as maiores correlações encontradas entre esses parâmetros foram negativas (ou seja, aumentando K_s , WR_a diminui e vice-versa), e apenas positiva e fraca para textura média. Esse resultado chama a atenção por serem respectivamente de textura fina e textura grossa. Essa correlação também aparece de forma moderada e significativa no quando todas texturas foram agrupadas na análise. Com exceção da textura média, as separações texturais que apresentaram correlações para ambas as escalas foram superiores quando o índice utilizado foi o de escala numérica e não pF . As correlações foram maiores de K_s com WR_a na textura muito argilosa e siltosa, foram maiores com $\log(WR_a)$ quando todas as texturas foram agrupadas e textura arenosa, e com WR_{a-pF} foram maiores para textura média e argilosa (nesta foi encontrada correlação significativa apenas com WR_{a-pF}). A dominância de WR_a em escala numérica frente ao índice A_a gerou mais correlações significativas entre $\log(K_s)$ e WR_a .

Os índices relativos tiveram poucas correlações significativas com a condutividade, sendo elas nas texturas agrupadas e nas separações de textura argilosa e arenosa. Embora de acordo com Armindo e Wendroth (2019) os índices relativos em escala pF são mais indicados

para detectar mudanças na QFS que os índices em escala numérica, não houve uma melhor correlação entre K_s e esses índices.

A soma dos índices absolutos se correlacionaram negativa e significativamente com $\log(K_s)$ para todas as separações (considerando o logaritmo da soma e as duas escalas), com exceção da textura média onde houve correlação positiva de A_a+WR_a e $A_{a-pF} + WR_{a-pF}$ com $\log(K_s)$. Somente na textura média notou-se uma correlação maior e mais significativa entre $\log(K_s)$ e a soma dos índices absolutos em escala pF , ressaltando a importância dessa escala para tal textura. E para a textura argilosa foi observada apenas correlação significativa entre $\log(K_s)$ e $\log(A_a+WR_a)$. Destaca-se que a soma dos índices absolutos em escala numérica teve correlações significativas com $\log(K_s)$ em 4 das 5 classes texturais (não havendo apenas na textura argilosa, onde foi encontrada correlação negativa fraca entre $\log(K_s)$ e o log da soma dos índices absolutos). Para todas as classes texturais as correlações foram maiores em escala numérica do que em escala pF . Isto implica que toda a área sob a CRAS, do ponto de murchamento permanente até a saturação, se correlaciona de forma linear (e significativa) com K_s . Isso explica porque em todas as classes texturais houve alguma correlação significativa entre K_s e os índices absolutos, seja em escala numérica ou pF , confirmando que, uma parte da CRAS já é linearmente correlacionável com K_s (apenas na textura siltosa não foi encontrada correlação significativa entre um dos índices absolutos e K_s em escala pF , para esta textura foi encontrada correlação significativa entre K_s e WR_a em escala numérica e $\log WR_a$). Dessa forma, futuros trabalhos de PTFs para predição de K_s podem utilizar a soma dos índices absolutos como mais um parâmetro de predição. Uma vez que K_s é propriedade estrutural, há vários parâmetros que se correlacionam com ela.

Nemes *et al.* (2005) realizaram um estudo com amostras de solos retiradas de banco de dados da Europa ($N = 1108$), Hungria ($N = 131$) (dados não inclusos no banco de dados da Europa) e EUA ($N = 886$). A base de dados possuía grande variedade textural e os autores correlacionaram $\log(K_s)$ de forma significativa para o banco europeu com areia ($r = 0,557$), silte ($r = -0,438$) e argila ($r = -0,499$), para o banco húngaro com areia ($r = 0,356$), silte ($r = -0,104$), argila ($r = -0,460$), densidade do solo ($r = -0,210$) e teor de matéria orgânica ($r = -0,202$), e para o banco de dados estadunidense com areia ($r = 0,646$), silte ($r = -0,473$), argila ($r = -0,621$), densidade do solo ($r = -0,264$) e teor de matéria orgânica ($r = -0,074$), resultados que ressaltam o quanto estrutura formada pela disposição das partículas é correlacionada com K_s . Nos dois bancos (húngaro e estadunidense) que possuem mais areia em sua média textural observou-se maior correlação entre $\log(K_s)$ e todas as correlações significativas testadas. Dessa forma, K_s

parece se relacionar melhor com a estrutura de solos com predominância de partículas mais finas. Neste estudo observou-se correlação inversa de Spearman entre WR_a e A_{a-pF} .

Para textura arenosa, obtiveram-se correlações lineares negativas moderadas significativas para os índices absolutos (A_a e WR_a) e fracas significativas para os índices relativos. Outras propriedades edáficas que explicam o comportamento de K_s são encontradas na literatura, como a correlação negativa com a quantidade de carbono no solo ($r = -0,554$) e positiva com o conteúdo de areia do solo ($r = 0,494$) em solos arenosos das Colinas do Nebraska (EUA) (Wang *et al.*, 2009).

Em um estudo feito com solos de Kharga Oasis, no deserto ocidental do Egito, em que foram analisadas 101 amostras de solo franco-arenoso, 19 de franco-argiloso-arenoso, 15 de areia-argilosa, 5 de franco-argiloso e 5 de arenoso (Soil Survey Staff, 1999), correlações entre $\log(K_s)$ e variáveis relacionadas com a estrutura do solo foram encontradas. Como exemplo, os autores reportaram correlações negativas moderadas entre $\log(K_s)$ e as umidades na saturação ($r = -0,42$), na capacidade de campo ($r = -0,58$) e no ponto de murchamento permanente ($r = -0,59$), correlações fracas com o teor de silte ($r = -0,27$) e de carbonato de cálcio ($r = -0,30$), além da razão de adsorção de sódio ($r = -0,39$) e da densidade do solo ($r = 0,33$) (Gamie e De Smedt, 2017). Ainda de acordo com os autores, as correlações negativas de $\log(K_s)$ com as constantes de umidade do solo indicam dependência da condutividade hidráulica de microporos. A correlação negativa de K_s com a razão de adsorção de sódio indica um possível entupimento dos poros ou aumento da descontinuidade/tortuosidade/cimentação porosa pelo aumento do teor de sódio no solo. A correlação negativa de $\log(K_s)$ com silte indica a dependência de K_s da textura do solo (Gamie e De Smedt, 2017).

Nas tabelas a seguir estão os resultados da correlação entre $\log(K_s)$ e ϕ_D e AD seguidos pela correlação com os índices absolutos divididos pela sua faixa de umidade, ou seja, A_a por ϕ_D e WR_a por AD . A divisão de A_a por unidade de porosidade drenável e WR_a por unidade de água disponível no solo tornou possível a comparação de diferentes texturas melhorando as correlações entre as variáveis para as texturas agrupadas. Dessa forma, a análise desses novos parâmetros tornou-se mais ponderada na comparação entre texturas, já que agora a média dos índices hidráulico-energéticos por unidade de umidade no solo foi aplicada.

Tabela 15 - Correlações entre K_s e os índices hidráulico-energéticos para as texturas agrupadas ($N = 395$).

<i>Índice</i>	$\log_{10}(K_s)$	Classificação
ϕ_D	$r = 0,461^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = 0,521^{***}$	<i>Moderada</i>
AD	$r = 0,099^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,051$	<i>Sem correlação</i>
A_a/ϕ_D	$r = -0,235^{***}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,100^*$	<i>Fraca</i>
WR_a/AD	$r = -0,477^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,540^{***}$	<i>Moderada</i>
ϕ_{D-pF}	$r = 0,246^{***}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,428^{***}$	<i>Moderada</i>
AD_{pF}	$r = 0,157^{**}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,067$	<i>Sem correlação</i>
A_{a-pF}/ϕ_{D-pF}	$r = -0,081$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,042$	<i>Sem correlação</i>
WR_{a-pF}/AD_{pF}	$r = -0,165^{***}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,415^{***}$	<i>Moderada</i>

***: significativo para P -valor $< 0,1\%$, **: significativo para P -valor $< 1,0\%$, *: significativo para P -valor $< 5,0\%$, outros valores: não significativos.

Fonte: do autor (2022).

Tabela 16 - Correlações entre K_s e os índices hidráulico-energéticos para textura média ($N = 147$).

<i>Índice</i>	$\log_{10}(K_s)$	Classificação
ϕ_D	$r = 0,221^{**}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,210^*$	<i>Fraca</i>
AD	$r = 0,505^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = 0,488^{***}$	<i>Moderada</i>
A_a/ϕ_D	$r = -0,213^{**}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,242^{**}$	<i>Fraca</i>
WR_a/AD	$r = -0,292^{***}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,264^{**}$	<i>Fraca</i>
ϕ_{D-pF}	$r = 0,205^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,189^*$	<i>Fraca</i>
AD_{pF}	$r = 0,505^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = 0,488^{***}$	<i>Moderada</i>
A_{a-pF}/ϕ_{D-pF}	$r = -0,206^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,238^{**}$	<i>Fraca</i>
WR_{a-pF}/AD_{pF}	$r = -0,286^{***}$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,282^{***}$	<i>Fraca</i>

***: significativo para P -valor $< 0,1\%$, **: significativo para P -valor $< 1,0\%$, *: significativo para P -valor $< 5,0\%$, outros valores: não significativos.

Fonte: do autor (2022).

Tabela 17 - Correlações entre K_s e os índices hidráulico-energéticos para textura arenosa ($N = 96$).

<i>Índice</i>	$\log_{10}(K_s)$	Classificação
ϕ_D	$r = 0,332^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = 0,384^{***}$	<i>Moderada</i>
AD	$r = -0,049$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,054$	<i>Sem correlação</i>
A_a/ϕ_D	$r = -0,497^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,577^{***}$	<i>Moderada</i>
WR_a/AD	$r = -0,502^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,573^{***}$	<i>Moderada</i>
ϕ_{D-pF}	$r = 0,352^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = 0,395^{***}$	<i>Moderada</i>
AD_{pF}	$r = -0,036$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,052$	<i>Sem correlação</i>
A_{a-pF}/ϕ_{D-pF}	$r = -0,412^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,553^{***}$	<i>Moderada</i>
WR_{a-pF}/AD_{pF}	$r = -0,651^{***}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,688^{***}$	<i>Moderada</i>

***: significativo para P -valor $< 0,1\%$, **: significativo para P -valor $< 1,0\%$, *: significativo para P -valor $< 5,0\%$, outros valores: não significativos.

Fonte: do autor (2022).

Tabela 18 - Correlações entre K_s e os índices hidráulico-energéticos para textura argilosa ($N = 61$).

<i>Índice</i>	$\log_{10}(K_s)$	Classificação
ϕ_D	$r = 0,231$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,197$	<i>Fraca</i>
AD	$r = 0,307^{**}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = 0,231$	<i>Fraca</i>
A_a/ϕ_D	$r = -0,268^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,172$	<i>Fraca</i>
WR_a/AD	$r = -0,341^{**}$	<i>Moderada</i>
	$\rho = -0,380^{**}$	<i>Moderada</i>
ϕ_{D-pF}	$r = 0,220$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,056$	<i>Sem correlação</i>
AD_{pF}	$r = -0,027$	<i>Fraca</i>
	$\rho = 0,106$	<i>Fraca</i>
A_{a-pF}/ϕ_{D-pF}	$r = -0,252^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,163$	<i>Fraca</i>
WR_{a-pF}/AD_{pF}	$r = -0,275^*$	<i>Fraca</i>
	$\rho = -0,278^*$	<i>Fraca</i>

***: significativo para P -valor $< 0,1\%$, **: significativo para P -valor $< 1,0\%$, *: significativo para P -valor $< 5,0\%$, outros valores: não significativos.

Fonte: do autor (2022).

Tabela 19 - Correlações entre K_s e os índices hidráulico-energéticos para textura muito argilosa ($N = 46$).

<i>Índice</i>	$\log_{10}(K_s)$	Classificação
ϕ_D	$r = 0,045$ $\rho = 0,071$	<i>Fraca</i> <i>Sem correlação</i>
AD	$r = 0,002$ $\rho = -0,234$	<i>Fraca</i> <i>Fraca</i>
A_a/ϕ_D	$r = -0,163$ $\rho = -0,265$	<i>Fraca</i> <i>Fraca</i>
WR_a/AD	$r = -0,351^{**}$ $\rho = -0,581^{***}$	<i>Moderada</i> <i>Moderada</i>
ϕ_{D-pF}	$r = -0,215$ $\rho = -0,143$	<i>Fraca</i> <i>Fraca</i>
AD_{pF}	$r = 0,204$ $\rho = -0,109$	<i>Fraca</i> <i>Fraca</i>
A_{a-pF}/ϕ_{D-pF}	$r = -0,177$ $\rho = -0,076$	<i>Fraca</i> <i>Sem correlação</i>
WR_{a-pF}/AD_{pF}	$r = 0,080$ $\rho = -0,318^{**}$	<i>Fraca</i> <i>Moderada</i>

***: significativo para P -valor $< 0,1\%$, **: significativo para P -valor $< 1,0\%$, *: significativo para P -valor $< 5,0\%$, outros valores: não significativos.

Fonte: do autor (2022).

Tabela 20 - Correlações entre K_s e os índices hidráulico-energéticos para textura siltosa ($N = 45$).

<i>Índice</i>	$\log_{10}(K_s)$	Classificação
ϕ_D	$r = 0,059$ $\rho = 0,082$	<i>Fraca</i> <i>Sem correlação</i>
AD	$r = 0,162$ $\rho = 0,198$	<i>Fraca</i> <i>Fraca</i>
A_a/ϕ_D	$r = -0,229$ $\rho = -0,247$	<i>Fraca</i> <i>Fraca</i>
WR_a/AD	$r = -0,431^{**}$ $\rho = -0,476^{**}$	<i>Moderada</i> <i>Moderada</i>
ϕ_{D-pF}	$r = 0,072$ $\rho = 0,082$	<i>Fraca</i> <i>Sem correlação</i>
AD_{pF}	$r = 0,144$ $\rho = 0,178$	<i>Fraca</i> <i>Fraca</i>
A_{a-pF}/ϕ_{D-pF}	$r = -0,241$ $\rho = -0,239$	<i>Fraca</i> <i>Fraca</i>
WR_{a-pF}/AD_{pF}	$r = -0,429^{**}$ $\rho = -0,432^{**}$	<i>Moderada</i> <i>Moderada</i>

***: significativo para P -valor $< 0,1\%$, **: significativo para P -valor $< 1,0\%$, *: significativo para P -valor $< 5,0\%$, outros valores: não significativos.

Fonte: do autor (2022).

Nota-se nas tabelas 15, 16, 17, 18, 19 e 20 que em todas as separações texturais houve correlação linear entre $\log(K_s)$ e WR_a/AD , mesmo quando não houve entre $\log(K_s) \times WR_a$ e $\log(K_s) \times AD$, indicando que para PTFs de predição de $\log(K_s)$ a razão WR_a/AD pode ser um

importante parâmetro de entrada. Ao comparar os resultados das correlações significativas entre os parâmetros WR_a e AD e WR_a/AD , apenas para a textura média houve maior correlação de $\log(K_s)$ com WR_{a-pF} e AD , e para textura muito argilosa houve maior correlação de Pearson entre $\log(K_s)$ e WR_a . Ao comparar os resultados das correlações entre $\log(K_s) \times WR_a/AD$ e $\log(K_s) \times WR_{a-pF}/AD_{pF}$, notou-se um melhor resultado apenas para a textura arenosa, nas demais, WR_a/AD destaca-se.

Para as correlações entre $\log(K_s)$ e A_a/ϕ_D houve significância em 4 das 6 separações texturais testadas. Nas 4 separações onde ocorreram correlações significativas de $\log(K_s)$ com A_a/ϕ_D , houve apenas para as texturas agrupadas maior correlação de $\log(K_s)$ com A_{a-pF} e ϕ_D , nas demais as correlações de $\log(K_s)$ e A_a/ϕ_D foram melhores que os índices na individualidade. Ressalta-se que para esses parâmetros houve mais correlações moderadas, e em alguns casos onde a classificação da correlação permaneceu a mesma houve valores mais próximos de 1 ou -1, quando utilizada a escala numérica do que a escala pF . Em poucos casos a escala pF foi ligeiramente superior em relação a escala numérica nas correlações obtidas, porém na maior parte das correlações a diferença foi elevada. Portanto, recomenda-se a utilização desses parâmetros em escala numérica.

As faixas AD e ϕ_D apresentaram destaque para algumas correlações feitas com $\log(K_s)$. As correlações de AD foram significativas e moderadas para as texturas argilosa e média e significativa e fraca para as texturas agrupadas, já ϕ_D apresentou correlações significativas e moderadas para textura arenosa (sendo ϕ_{D-pF} ligeiramente superior a escala numérica) e para as texturas agrupadas. ϕ_D ainda mostrou correlação significativa e fraca para textura média, dessa forma, nota-se que AD se correlacionou melhor com $\log(K_s)$ em texturas mais finas (embora na textura muito argilosa não foram observadas correlações significativas) e ϕ_D se correlacionou melhor com $\log(K_s)$ em texturas mais grossas. Ressalta-se que a única separação de dados em que a correlação de $\log(K_s)$ com A_a/ϕ_D não foi superior a correlação de $\log(K_s)$ com ϕ_D foi para as texturas agrupadas, e a única separação de dados em que a correlação de $\log(K_s)$ com WR_a/AD não foi superior a correlação de $\log(K_s)$ com AD foi para a textura média, destacando novamente a importância do uso de A_a/ϕ_D e WR_a/AD na análise da QFS.

Ao comparar as correlações obtidas de $\log(K_s)$ com WR_a/AD e A_a/ϕ_D com as correlações calculadas anteriormente na individualidade dos índices absolutos, observou-se que algumas correlações feitas com A_a/ϕ_D aumentaram expressivamente (em módulo já que algumas correlações são negativas) para todos os casos em relação as correlações feitas com A_a , sendo que a correlação passou a ser significativa para as texturas média e argilosa, mudou de classificação fraca para moderada pela correlação de Pearson para a textura arenosa, e apenas

para as texturas muito argilosa e siltosa manteve-se sem significância, porém ainda sim houve aumento da correlação. Ao comparar as correlações obtidas de $\log(K_s)$ com WR_a e WR_a/AD , observaram-se maiores valores (em módulo já que algumas correlações são negativas) para as correlações de $\log(K_s)$ com WR_a/AD em 5 das 6 separações estudadas em relação as correlações feitas com WR_a . Houve aumento das correlações nas texturas agrupadas, média, arenosa e argilosa que se tornaram significativas e passam de classificação fraca para moderada. Para a textura siltosa as correlações tornaram-se significativas, sendo que a classificação da correlação de Pearson passou de fraca para moderada. Por fim, a textura na qual não se constatou vantagem ao utilizar o índice WR_a/AD foi a muito argilosa, já que as correlações de $\log(K_s)$ e WR_a foram maiores.

Nestas últimas correlações apresentadas evidenciou-se que para a maior parte dos casos analisados os parâmetros WR_a/AD e A_a/ϕ_D são mais correlacionados com $\log(K_s)$ do que quando analisados individualmente. Novamente, a escala numérica proporcionou melhores resultados que a escala pF , salvo as exceções destacadas.

Novamente houve um domínio de correlações lineares significativas com $\log(K_s) \times WR_a$, uma possível justificativa para isso é a dominância de WR_a na CRAS relativamente a A_a . Ademais, os resultados das tabelas 9, 10, 11, 12, 13 e 14 mostram que a maior parte das correlações significativas observadas correlacionam $\log(K_s)$ com os índices em escala numérica. Entretanto, os resultados obtidos com a escala pF não devem ser descartados, visto que correlações significativas para esta escala também foram encontradas, sendo alguns resultados superiores ao da escala numérica, por exemplo, para textura arenosa a correlação $\log(K_s) \times WR_{a-pF}/AD_{pF}$ foi superior à da escala numérica.

Shi *et al.* (2011) também utilizaram da razão WR_a/AD ao analisar solos de textura arenosa e média do sul ao norte de solos sedimentares no planalto chinês (China), porém para obter WR_a os autores optaram pelo modelo de CRAS de Campbell (1974). A fim de comparar WR_a para diferentes frações de AD , a energia integral média trabalhada para reter uma unidade de água disponível (WR_a/AD) foi de 258,9 J/cm³ cm⁻³, 180,1 J/cm³ cm⁻³, 132,6 J/cm³ cm⁻³ e 131,1 J/cm³ cm⁻³ para a textura *leavy loam*, *Middle loam*, *light loam* e arenosa, respectivamente.

6 CONCLUSÃO

No presente estudo, uma análise da correlação entre os resultados dos índices hidráulico-energéticos em escala numérica e pF e a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) foi profundamente realizada. Um número maior e mais significativo de correlações lineares foi encontrado com os índices em escala numérica, porém para os solos de textura média isso não ocorreu, para tais amostras, as correlações maiores e mais significativas foram aquelas com os índices em escala pF , mostrando a importância desta escala em tal textura. Esses resultados ratificam a influência significativa de K_s sobre ao menos um dos índices hidráulico-energéticos absolutos (A_a e WR_a) em todas as separações texturais realizadas. Em duas dessas separações a influência de K_s ocorreu sobre os dois índices, K_s também teve influência na soma dos índices absolutos (sendo apenas em escala numérica para texturas agrupadas e nas texturas argilosa e siltosa, e para ambas as escalas nas demais separações texturais) em todas as separações, sendo necessário em apenas uma delas (textura argilosa) aplicar log na soma dos índices absolutos para obter uma correlação linear significativa. Destaca-se também que melhores correlações significativas com $\log(K_s)$ foram encontradas quando utilizado as razões WR_a/AD e A_a/ϕ_D em comparação as correlações significativas desses índices de forma individual, já que na maior parte dos resultados houve uma melhora ao utilizar WR_a/AD e A_a/ϕ_D . As correlações entre $\log(K_s)$ e WR_a/AD quando comparada com a correlação entre $\log(K_s)$ e WR_a teve mudança de classificação fraca e não significativa para moderada e significativa na textura siltosa, de classificação fraca e não significativa para moderada e significativa na textura argilosa.

As correlações entre $\log(K_s)$ e A_a/ϕ_D quando comparada com a correlação entre $\log(K_s)$ e A_a teve mudança de classificação fraca para moderada para a textura arenosa, de classificação sem correlação e não significativa para fraca e significativa na textura média, de classificação fraca para moderada na textura arenosa. Em todas as separações texturais feitas houve melhora nas correlações dos índices A_a para A_a/ϕ_D , e de WR_a para WR_a/AD apenas não houve melhora para a textura muito argilosa. Também é destacável que nas texturas média e argilosa não havia significância nas correlações de $\log(K_s)$ com A_a e passou a haver nas correlações de $\log(K_s)$ com A_a/ϕ_D e na textura argilosa não havia significância nas correlações de $\log(K_s)$ com WR_a e passou a haver nas correlações de $\log(K_s)$ com WR_a/AD . Essas novas condições destacam a correlação entre $\log(K_s)$ com as relações dos índices hidráulico-energéticos absolutos com os parâmetros hidráulicos (AD e ϕ_D), aumento as correlações obtidas quando descrito $\log(K_s)$ com função individual dos índices.

As correlações significativas obtidas para as texturas agrupadas podem apontar variáveis para uso da predição de K_s por meio de PTFs. Assim, PTFs para a predição de $\log(K_s)$ podem ser elaboradas com os índices A_{a-pF} , WR_a , $\log(WR_a)$, A_a+WR_a , $\log(A_a+WR_a)$, WR_a/AD e ϕ_D .

Por fim, a falta de altas correlações lineares de Pearson e Spearman próximos a 1,0 ou -1,0 não representa a não dependência da condutividade hidráulica dos índices hidráulico-energéticos do solo, mas apenas que eles não explicam por si só, de forma linear, o comportamento da condutividade, mostrando que ela é também correlacionada com outros atributos texturais e estruturais do solo. Considera-se, portanto, correlações significativas (mesmo que fracas ou moderadas) resultados satisfatórios que explicam a relação entre K_s e os índices hidráulico-energéticos do solo (mesmo que não únicas).

REFERÊNCIAS

- AGHAKOUCHAK, A.; HABIB, E. 2010. **Application of a conceptual hydrologic model in teaching hydrologic processes.** International Journal of Engineering Education, v. 26, n. 4 (S1), p. 963-973. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/3sv066q5>. Acesso em: 07 fev. 2022.
- ALAGNA, V.; IOVINO, M.; BAGARELLO, V.; MATAIX-SOLERA, J.; LICHNER, L. 2018. **ALTERNATIVE ANALYSIS OF TRANSIENT INFILTRATION EXPERIMENT TO ESTIMATE SOIL WATER REPELLENCY.** Hydrological Processes. v. 33, n. 4, p. 661-674. doi:10.1002/hyp.13352
- ARAYA, S. N.; GHEZZEHEI, T. A. 2019. **Using Machine Learning for Prediction of Saturated Hydraulic Conductivity and its Sensitivity to Soil Structural Perturbations.** Water Resources Research. v. 55, n. 7, p. 5715-5737. doi:10.1029/2018wr024357
- ARMINDO, R. A.; VAN LIER, Q. de J.; TUREK, M. E.; DOS REIS, A. M. H.; MELO, M. L. A. de; RAMOS, M. E. P.; ONO, G. M. 2019. **Performance of the Groenevelt and Grant Model for Fitting Soil Water Retention Data from Brazilian Soils.** Revista Brasileira de Ciência Do Solo, 43. Doi:10.1590/18069657rbc20180217
- ARMINDO, R. A.; WENDROTH, O. 2016. **Physical Soil Structure Evaluation based on Hydraulic Energy Functions.** Soil Science Society of America Journal, v. 80, n. 5, p. 1167-1180. doi:10.2136/sssaj2016.03.0058
- ARMINDO, R. A.; WENDROTH, O. 2019. **Alternative approach to calculate soil hydraulic-energy-indices and -functions.** Geoderma, v. 355, p. 113903. Doi:10.1016/j.geoderma.2019.113903
- BACHER, M. G.; ARMINDO, R.A.; SCHMIDT, O.; BONDI, G.; FENTON, O. 2021. **Testing numeric and logarithmic scales for hydraulic-energy indices and functions to assess physical earthworm effects on soil structure.** Geoderma Regional, p. 466. Doi:10.1016/j.geodrs.2021.e00466
- 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 Science Society of America Journal, n. 1, p. 5-17. Doi:10.2136/sssaj2018.06.0218
- BACHER, M. G.; SCHMIDT, O.; BONDI, G.; FENTON, O. 2020. **Influence of dung pats on soil physical quality mediated by earthworms: from dung deposition to decay and beyond.** Soil Research. V. 58, n. 5, p. 421-429. Doi:10.1071/sr19319
- BACHER, M.G.; FENTON, O.; BONDI, G.; CREAMER, R.E.; KARMARKAR, M.; SCHMIDT, O. 2018. **The impact cattle dung pats on earthworm distribution in grazed pastures.** BMC Ecol. 18., 59. Doi:10.1186/s12898-018-0216-6
- BAGARELLO V.; ELRICK D.E.; IOVINO M.; SGROI A. 2006. **A laboratory analysis of falling head infiltration procedures for estimating the hydraulic conductivity of soils.** Geoderma v. 135, p. 322-334.

- BAGARELLO, V.; BAIAMONTE, G.; CAIA, C. 2019. **Variability of near-surface saturated hydraulic conductivity for the clay soils of a small Sicilian basin.** *Geoderma*, v. 340, p. 133–145. Doi:10.1016/j.geoderma.2019.01.008
- BAGARELLO, V.; DI PRIMA, S.; IOVINO, M. 2017. **Estimating saturated soil hydraulic conductivity by the near steady-state phase of a Beerkan infiltration test.** *Geoderma*, v. 303, p. 70–77. Doi:10.1016/j.geoderma.2017.04.030
- BAIAMONTE, G.; BAGARELLO, V.; D'ASARO, F.; PALMERI, V. 2017. **Factors Influencing Point Measurement of Near-surface Saturated Soil Hydraulic Conductivity in a Small Sicilian Basin.** *Land Degradation & Development*, v. 28, n. 3, p. 970-982. Doi:10.1002/ldr.2674
- BARBOSA, M. C. 2014. **Utilização do permeâmetro Guelph no antigo depósito de resíduos de Rolândia-PR.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- BOUMA, J., 1989. **Using soil survey data for quantitative land evaluation.** *Advances in Soil Science*, Springer, New York, NY. P. 177-213. doi: 10.1007/978-1-4612-3532-3_4
- BREVIK, E. C.; HARTEMINK, A. E. 2010. **Early soil knowledge and the birth and development of soil science.** *CATENA*, 83(1), 23–33. doi:10.1016/j.catena.2010.06.011
- BROOKS, R.; COREY, T. 1964. **Hydraulic properties of porous media.** *Hydrology Papers*, Colorado State University, v. 24, p. 37.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. 2005. **Soil structure and management: a review.** *Geoderma*, 124(1-2), 3–22. doi:10.1016/j.geoderma.2004.03.005
- BRYK, M.; KOŁODZIEJ, B.; SŁOWIŃSKA-JURKIEWICZ, A.; JAROSZUK-SIEROCIŃSKA, M. 2017. **Evaluation of soil structure and physical properties influenced by weather conditions during autumn-winter-spring season.** *Soil Tillage Res.* V. 170, p. 66-76. Doi:10.1016/j.still.2017.03.004
- BUTTLE, J. M.; HOUSE, D. A. 1997. **Spatial variability of saturated hydraulic conductivity in shallow macroporous soils in a forested basin.** *Journal of Hydrology*, v. 203, n. 1-4, p. 127-142. Doi:10.1016/s0022-1694(97)00095-4
- CASTELLINI, M.; STELLACCI, A. M.; BARCA, E.; IOVINO, M. 2019. **Application of Multivariate Analysis Techniques for Selecting Soil Physical Quality Indicators: A Case Study in Long-Term Field Experiments in Apulia (Southern Italy).** *Soil Science Society of America Journal*, v. 83, n. 3, p. 707-720. Doi:10.2136/sssaj2018.06.0223
- CAMPBELL, G.S. 1974. **A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data.** *Soil Sci.* Vol. 117, no. 6, p. 311-314.
- CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. 2016. **Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil.** *Geoderma*, 267, 156–168. doi:10.1016/j.geoderma.2016.01.004

CONCIALDI, P.; BAGARELLO, V.; ALAGNA, V.; IOVINO, M. 2019. **Laboratory evaluation of falling-head infiltration for saturated soil hydraulic conductivity determination.** Journal of Agricultural Engineering. V. 51, n. 1, p. 27-35.
Doi:10.4081/jae.2019.1003

COSTANTINI, E. A. C.; BRANQUINHO, C.; NUNES, A.; SCHWILCH, G.; STAVI, I.; VALDECANTOS, A.; ZUCCA, C. 2016. **Soil indicators to assess the effectiveness of restoration strategies in dryland ecosystems.** Solid Earth, v. 7, n. 2, p. 397-414.
Doi:10.5194/se-7-397-2016

CRIADO, S. V. M. de S.; FRANÇA, S. L. S. **Ajustes de curvas de retenção de água para amostras indeformadas e deformadas em diferentes texturas de solo.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2018.

DA SILVA, A. C.; ARMINDO, R. A.; MINASNY, B.; PREVEDELLO, C. L. **Evaluating the Splintex model for estimating the soil water retention curve for a wide range of soils.** Soil and Tillage Research, v. 209, p. 104974, 2021. doi: 10.1016/j.still.2021.104974

DA SILVA, A. C.; ARMINDO, R. A.; PREVEDELLO, C. L. 2020. **Splintex 2.0:** A physically-based model to estimate water retention and hydraulic conductivity parameters from soil physical data. Computers and Electronics in Agriculture, v. 169, p. 105157.
doi:10.1016/j.compag.2019.105157

DARCY, H. 1856. **Les fontaines publiques de la ville de Dijon (Paris: Victor Dalmont).** Libraire des Corps Impreaux de Fonts et chaussees et de mines.

DE SOUZA; E. R.; MONTENEGRO, A. A. de A.; MONTENEGRO, S. M. G.; DE MATOS, J. de A. 2011. **Temporal stability of soil moisture in irrigated carrot crops in Northeast Brazil.** Agricultural Water Management, 99(1), 26–32. doi:10.1016/j.agwat.2011.08.002

DE WINTER, J. C. F.; GOSLING, S. D.; POTTER, J. 2016. **Comparing the Pearson and Spearman correlation coefficients across distributions and sample sizes: A tutorial using simulations and empirical data.** Psychological Methods, 21(3), 273–290.
doi:10.1037/met0000079

DEXTER, A. R. 2004. **Soil physical quality.** Geoderma, 120(3-4), 227–239.
doi:10.1016/j.geoderma.2003.09.006

DOS REIS, A. M. H.; ARMINDO, R.; PIRES, L. 2019. **Physical assessment of a Haplohumox soil under integrated crop-livestock system.** Soil and Tillage Research, v. 194, p. 104294. doi:10.1016/j.still.2019.104294

DOS REIS, A. M. H.; AULER, A. C.; ARMINDO, R. A.; COOPER, M.; PIRES, L. F. 2021. **Micromorphological analysis of soil porosity under integrated crop-livestock management systems.** Soil and Tillage Research, 205, 104783.
doi:10.1016/j.still.2020.104783

- GAMIE, R.; DE SMEDT, F. 2017. **Experimental and statistical study of saturated hydraulic conductivity and relations with other soil properties of a desert soil.** *European Journal of Soil Science*, 69(2), 256–264. doi:10.1111/ejss.12519
- GONÇALVES, A. D. M. de A.; LIBARDI, P. L. 2013. **Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo.** *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, v. 37, p. 1174-1184. doi:10.1590/s0100-06832013000500007
- GRIGOLON, G. B.; DIOTTO, A. V.; LIMA, C. J. G. de S.; FRANCISCO, J. P.; FOLEGATTI, M. V. 2020. **Minimum number of points for a reliable soil water retention curve using Richards' pressure chamber.** *Revista Engenharia Na Agricultura - Reveng*, v. 28, p. 477-487. <https://doi.org/10.13083/reveng.v29i1.7320>
- GUPTA, R. K.; RUDRA, R. P.; DICKINSON, W. T.; PATNI, N. K.; WALL, G. J. 1993. **Comparison of saturated hydraulic conductivity measured by various field methods.** *Transactions of the ASAE*, v. 36, n. 1, p. 51-55. doi:10.13031/2013.28313
- GUPTA, S. C.; LARSON, W. E. 1979. **Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density.** *Water Resources Research*, v. 15, n. 6, p. 1633-1635. doi:10.1029/wr015i006p01633
- HUF DOS REIS, A. M.; ARMINDO, R. A.; DURÃES, M. F.; DE JONG VAN LIER, Q. 2018. **Evaluating pedotransfer functions of the Splintex model.** *European Journal of Soil Science*, v. 69, n. 4, p. 685-697. doi:10.1111/ejss.12675
- IBRAHIM, M. M.; ALIYU, J. 2016. **Comparison of Methods for saturated hydraulic conductivity determination: field, laboratory and empirical measurements (A Preview).** *Current Journal of Applied Science and Technology*, v. 15, n. 3, p. 1-8, 2016. doi:10.9734/BJAST/2016/24413
- KOSUGI, K. 1996. **Lognormal Distribution Model for Unsaturated Soil Hydraulic Properties.** *Water Resources Research*, v. 32, n. 9, p. 2697-2703. doi:10.1029/96wr01776
- KOUREH, H. K.; ASGARZADEH, H.; MOSADDEGHI, M. R.; KHODAVERDILOO, H. 2019. **Critical Values of Soil Physical Quality Indicators Based on Vegetative Growth Characteristics of Spring Wheat (*Triticum aestivum* L.).** *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. v. 20, n. 2, p. 493-506. doi:10.1007/s42729-019-00134-8
- LAL, R.; REICOSKY, D. C.; HANSON, J. D. 2007. **Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming.** *Soil and Tillage Research*, 93(1), 1–12. doi:10.1016/j.still.2006.11.004
- LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SORIA UGALDE, J. M.; CUENCA, R.; Braud ,I.; Haverkamp ,R. 2006. **Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments—BEST.** *Soil Science Society of America Journal*, v. 70, n. 2, p. 521-532. doi:10.2136/sssaj2005.0026
- LEI, T.; PAN, Y.; LIU, H.; ZHAN, W.; YUAN, J. 2006. **A run off-on-ponding method and models for the transient infiltration capability process of sloped soil surface under**

rainfall and erosion impacts. Journal of Hydrology, v. 319, n. 1-4, p. 216-226.
doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.029

MALLANTS, D.; MOHANTY, B. P.; VERVOORT, A.; FEYEN, J. 1997. **Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores.** Soil Technology, 10(2), 115–131. doi:10.1016/s0933-3630(96)00093-1

MASSELINK, R. J. H.; HECKMANN, T.; TEMME, A. J. A. M.; ANDERS, N. S.; GOOREN, H. P. A.; KEESSTRA, S. D. 2016. **A network theory approach for a better understanding of overland flow connectivity.** Hydrological Processes, 31(1), 207–220.
doi:10.1002/hyp.10993

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B. 2003. **Integral energy as a measure of soil-water availability.** Plant Soil. v. 249, n. 2, p. 253-262. <https://doi.org/10.1023/A:1022825732324>.

MORBIDELLI, R.; SALTALIPPI, C.; FLAMMINI, A.; CIFRODELLI, M.; PICCIAFUOCO, T.; CORRADINI, C.; GOVINDARAJU, R. S. 2017. **In situ measurements of soil saturated hydraulic conductivity: Assessment of reliability through rainfall-runoff experiments.** Hydrological Processes, v. 31, n. 17, p. 3084-3094. doi:10.1002/hyp.11247

MORENO, R. O.; ARMINDO, R. A.; MORENO, R. L. 2019. **Development of a low-cost automated calorimeter for determining soil specific heat.** Computers and Electronics in Agriculture, 162, 348–356. doi:10.1016/j.compag.2019.04.015

MUALEM, Y. 1976. **A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.** Water Resources Research. v. 12, n. 3, p. 513-522. doi:10.1029/WR012i003p00513

Natural Resources Conservation Service, U.S. Department of Agriculture. National Soil Survey Handbook, Title 430-VI. Disponível em:
http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054242 (acessado em 8 de agosto de 2022).

NEMES, A.; RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A. 2005. **Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity.** Soil Science Society of America Journal, 69(4), 1330. doi:10.2136/sssaj2004.0055

NEMES, A.; SCHAAP, M.; LEIJ, F. J.; WÖSTEN, J. H. M. 2015. **UNSODA 2.0: Unsaturated Soil Hydraulic Database.** Database and program for indirect methods of estimating unsaturated hydraulic properties. US Salinity Laboratory - ARS - USDA.
doi:10.15482/USDA.ADC/1173246. Acessado em: 16-04-2021.

NIJP, J. J.; METSELAAR, K.; LIMPENS, J.; GOOREN, H. P. A.; VAN DER ZEE, S. E. A. T. M. 2017. **A modification of the constant-head permeameter to measure saturated hydraulic conductivity of highly permeable media.** MethodsX, v. 4, p. 134-142.
doi:10.1016/j.mex.2017.02.002

NUNES, M.R.; KARLEN, D.L.; MOORMAN, T.B. 2020. **Tillage Intensity Effects on Soil Structure Indicators—A US Meta-Analysis.** Sustainability. v. 12, n. 5, p. 2071.
Doi:10.3390/su12052071

PACHEPSKY, Y.; PARK, Y. 2015. **Saturated hydraulic conductivity of US soils grouped according to textural class and bulk density.** Soil Science Society of America Journal, 79 (4), p. 1094-1100. doi:10.2136/sssaj2015.02.0067

PETERS, A.; HOHENBRINK, T. L.; IDEN, S. C.; DURNER, W. 2021. **A simple model to predict hydraulic conductivity in medium to dry soil from the water retention curve.** Water Resources Research, v. 57, n. 5, p. e2020WR029211. doi:10.1029/2020WR029211

PHILIP, J.R. 1974. **Fifty years progress in soil physics.** Geoderma, v. 12, n. 4, p. 265-280.
PREVEDELLO C.L.; ARMINDO R.A. 2015. **Física do solo: com problemas resolvidos.** Curitiba: Celso Luiz Prevedello, 2 ed.

PREVEDELLO, C. L. 1999. **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.

R CORE TEAM. 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; Vogel, H.-J. 2018. **Soil structure as an indicator of soil functions: A review.** Geoderma, 314, 122–137. doi:10.1016/j.geoderma.2017.11.009

RASTGOU, M.; BAYAT, H.; MANSOORIZADEH, M.; GREGORY, A. S. 2020. **Estimating the soil water retention curve: Comparison of multiple nonlinear regression approach and random forest data mining technique.** Computers and Electronics in Agriculture, v. 174, p. 105502. doi:10.1016/j.compag.2020.105502

RATNER, B. 2009. **The correlation coefficient: Its values range between +1/-1, or do they?** Journal of Targeting, Measurement and Analysis for Marketing, 17(2), 139–142. doi:10.1057/jt.2009.5

REBEKIĆ, A.; LONČARIĆ, Z.; PETROVIĆ, S.; MARIĆ, S. 2015. **PEARSON'S OR SPEARMAN'S CORRELATION COEFFICIENT - WHICH ONE TO USE?** Poljoprivreda, 21(2), 47–54. doi:10.18047/poljo.21.2.8

REYNOLDS, W. D. 2017. **Use of bimodal hydraulic property relationships to characterize soil physical quality.** Geoderma, v. 294, p. 38-49. doi:10.1016/j.geoderma.2017.01.035

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, v. 152, n. 3-4, p. 252-263. doi:10.1016/j.geoderma.2009.06.009

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; YANG, X. M.; TAN, C. S.; YANG, J. Y. 2014. **Impacts of 48 years of consistent cropping, fertilization and land management on the physical quality of a clay loam soil.** Canadian Journal of Soil Science, v. 94, n. 3, p. 403-419. doi:10.4141/cjss2013-097

REYNOLDS, W. D.; YANG, X. M.; DRURY, C. F.; ZHANG, T. Q.; TAN, C. S. 2003. **Effects of selected conditioners and tillage on the physical quality of a clay loam soil.** Canadian Journal of Soil Science, v. 83, n. 4, p. 381-393. doi:10.4141/s02-066

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. 1985. **In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph permeameter.** Soil Science, v. 140, n. 4, p. 292-302. doi:10.1097/00010694-198510000-00008

REYNOLDS, W.D.; ZEBCHUK, W.D. 1996. **Hydraulic Conductivity in a Clay Soil: Two Measurement Techniques and Spatial Characterization.** Soil Science Society of America Journal, v. 60, n. 6, p. 1679-1685. doi:10.2136/sssaj1996.03615995006000060011x

REZAEI, M.; SAEY, T.; SEUNTJENS, P.; JORIS, I.; BOËNNE, W.; VAN MEIRVENNE, M.; CORNELIS, W. 2016. **Predicting saturated hydraulic conductivity in a sandy grassland using proximally sensed apparent electrical conductivity.** Journal of Applied Geophysics, 126, 35–41. doi:10.1016/j.jappgeo.2016.01.010

RICHARDS, L.A.; WEAVER, L.R., 1943. **Fifteen-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage.** Soil Science. v. 56, n. 5, p. 331-340. doi:10.1097/00010694-194311000-00002

RIENZNER, M.; GANDOLFI, C. 2014. **Investigation of spatial and temporal variability of saturated soil hydraulic conductivity at the field-scale.** Soil and Tillage Research, v. 135, p. 28-40. doi:10.1016/j.still.2013.08.012

ROLSTON, D. E. 2007. **Historical development of soil-water physics and solute transport in porous media.** Water Science and Technology: Water Supply, v. 7, n. 1, p. 59-66. doi:10.2166/ws.2007.007

SANDIN, M.; KOESTEL, J.; JARVIS, N.; LARSBO, M. 2017. **Post-tillage evolution of structural pore space and saturated and near-saturated hydraulic conductivity in a clay loam soil.** Soil and Tillage Research, v. 165, p. 161-168. doi:10.1016/j.still.2016.08.004

SANTOS H.G.; JACOMINE P.K.T.; ANJOS L.H.C.; OLIVEIRA V.A.; OLIVEIRA J.B.; COELHO M.R.; LUMBRERAS J.F.; CUNHA T.J.F. 2013. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 3. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

SHI, H., CHEN, F., WANG, H., HAN, B., 2011. **Using the energy integral of soil water retention curve to evaluate the soil water availability.** Water Resource and Environmental Protection. 3, 1632–1635. DOI: 10.1109/ISWREP.2011.5893351

SOIL SURVEY STAFF. 1999. **Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys.** Department of Agriculture handbook, v. 436, 2 ed.

TEIXEIRA, F.; BASCH, G.; ALAOU, A.; LEMANN, T.; WESSELINK, M.; SUKKEL, W.; LEMESLE, J; FERREIRA, C; VEIGA, ADÉLCIA; GARCIA-ORENES, F; MORUGÁN-CORONADO, A; MATAIX-SOLERA, J; KOSMAS, C; GLAVAN, M; ZOLTÁN, T; HERMANN, T; VIZITIU, O.P; LIPIEC, J; FRAC, M; REINTAM, E; XU, M; FU, H; FAN, H; FLESKENS, L. 2021. **Manuring effects on visual soil quality indicators and soil**

organic matter content in different pedoclimatic zones in Europe and China. Soil and Tillage Research, 212, 105033. doi:10.1016/j.still.2021.105033

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Y.; CRESTANA, S.; RAWLS, W. J. 2003. **Comparison of Two Techniques to Develop Pedotransfer Functions for Water Retention.** Soil Science Society of America Journal, v. 67, p. 1085. doi:10.2136/sssaj2003.1085

TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D.; COOK, F. J.; KIRBY, J. M.; CARTER, M. R. 1997. **Chapter 2 Physical attributes of soil quality.** Developments in Soil Science, Elsevier, v. 25, p. 21-58. doi:10.1016/s0166-2481(97)80029-3

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, v. 31, n. 5, p. 771-782, 2021. doi:10.1016/S1002-0160(20)60093-5

TUREK, M. E.; ARMINDO, R. A.; WENDROTH, O.; DOS SANTOS, I. 2018. **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. doi:10.1111/ejss.12747

VAN GENUCHTEN, M. T. 1980. **A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils.** Soil Science Society of America Journal, v. 44, n. 5, p. 892-898. doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

VIANA, P. C.; LIMA, G. A.; ALVES, A. da S.; LIMA, R. M. de S.; MEDEIROS, J. F. de; PEREIRA, M. M. 2015. Determinação da velocidade de infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **In: XXV CONIRD–Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem.** São Cristóvão-SE. Anais. 2015.

VOGEL, H.-J.; BARTKE, S.; DAEDLOW, K.; HELMING, K.; KÖGEL-KNABNER, I.; LANG, B.; RABOT, E.; RUSSELL, D.; STÖBEL, B.; WELLER, U.; WIESMEIER, M.; WOLLSCHLÄGER, U. 2018. **A systemic approach for modeling soil functions,** SOIL, v. 4, n. 1, p. 83-92. doi:10.5194/soil-4-83-2018, 2018.

WANG, T; WEDIN, D; ZLOTNIK, V. A. 2009. **Field evidence of a negative correlation between saturated hydraulic conductivity and soil carbon in a sandy soil.** Water Resources Research, v. 45, n. 7. doi:10.1029/2008wr006865

WENINGER, T.; KAMPTNER, E.; DOSTAL, T.; SPIEGEL, A.; STRAUSS, P. 2020. **Detection of physical hazards in soil profiles using quantitative soil physical quality assessment in the Pannonian basin, Eastern Austria.** Int. Agrophys., v. 34, n. 4, p. 463-471. <https://doi.org/10.31545/intagr/130450>

WHITE, R. E. 2006. **Principles and practice of soil science: the soil as a natural resource.** Blackwell Science Ltd 4th ed. ISBN 10: 0632064552

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.** Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 178(3), 486–498. doi:10.1002/jpln.201400090

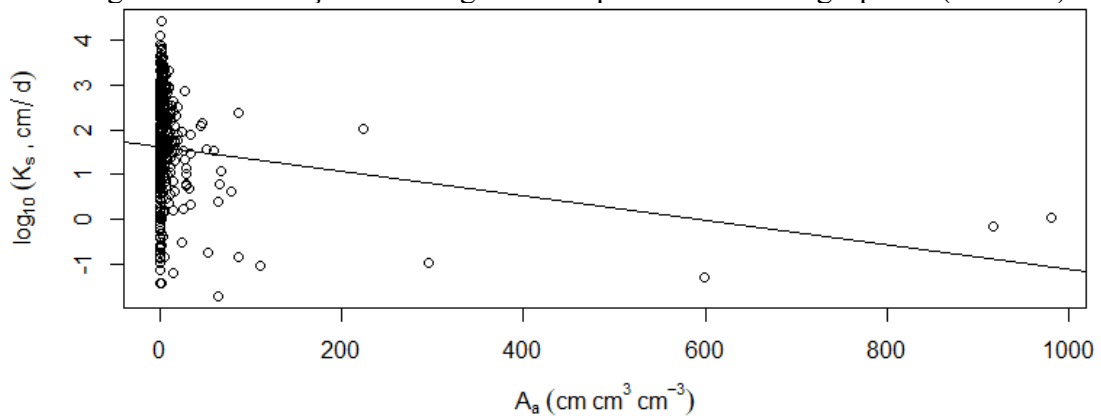
ZHANG, Y.; SCHAAP, M. G. 2019. **Estimation of Saturated Hydraulic Conductivity with Pedotransfer Functions: A Review.** Journal of Hydrology, v. 575, p. 1011-1030. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.05.058

ZHOU, J.; POMEROY, J. W.; ZHANG, W.; CHENG, G.; WANG, G.; CHEN, C. 2014. **Simulating cold regions hydrological processes using a modular model in the west of China.** Journal of Hydrology, v. 509, p. 13-24. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.11.013

APÊNDICE A – GRÁFICOS DE CORRELAÇÕES

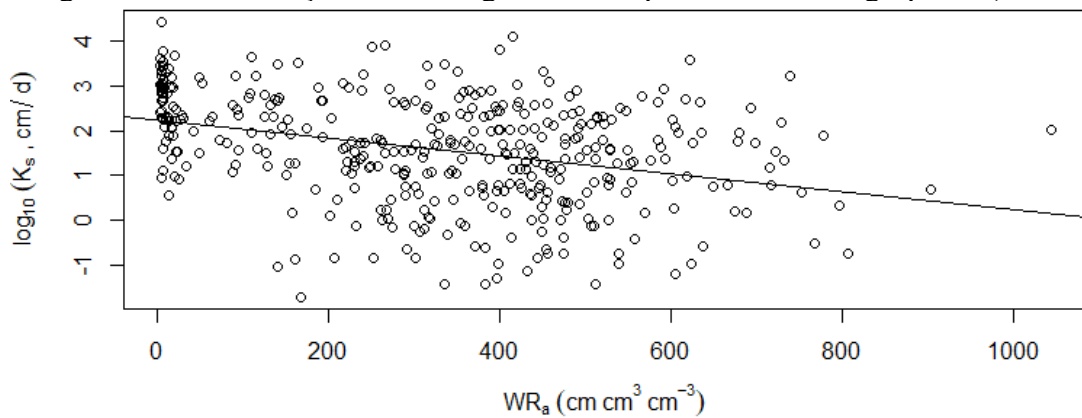
Os gráficos gerados por meio do *software* R para as correlações significativas de Pearson e de Spearman entre $\log_{10}(K_s)$ e os índices hidráulico-energéticos foram divididos para apresentação. Inicialmente, os gráficos são das texturas agrupadas e em seguida de acordo com a textura da amostra de solo.

Figura 8 - Correlação entre $\log_{10}K_s$ e A_a para as texturas agrupadas (N = 395).



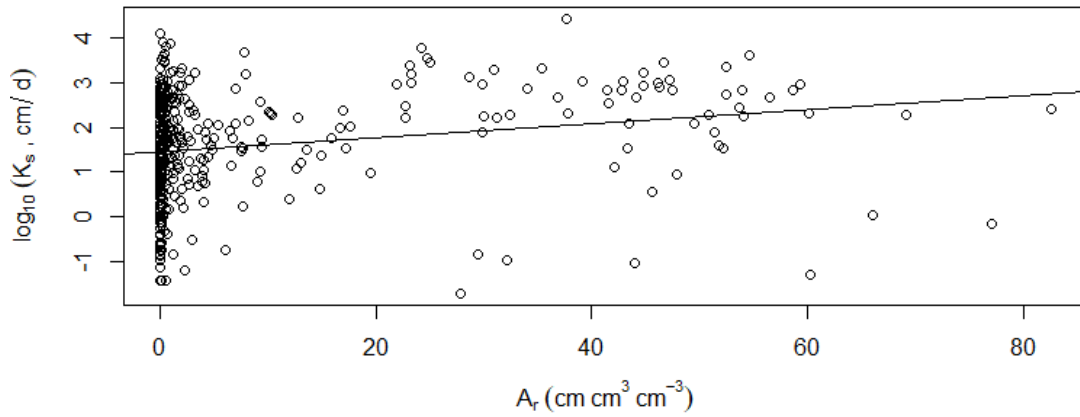
Fonte: do autor (2022).

Figura 9 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_a para as texturas agrupadas (N = 395).



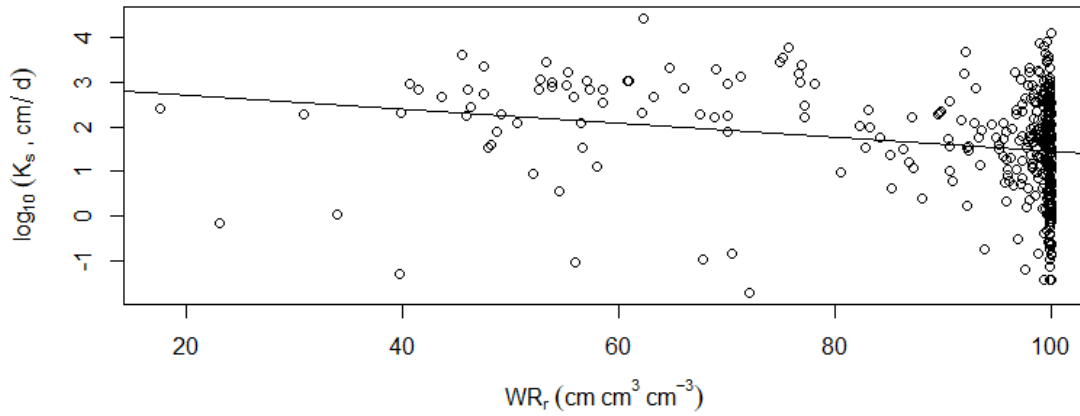
Fonte: do autor (2022).

Figura 10 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_r para as texturas agrupadas (N = 395).



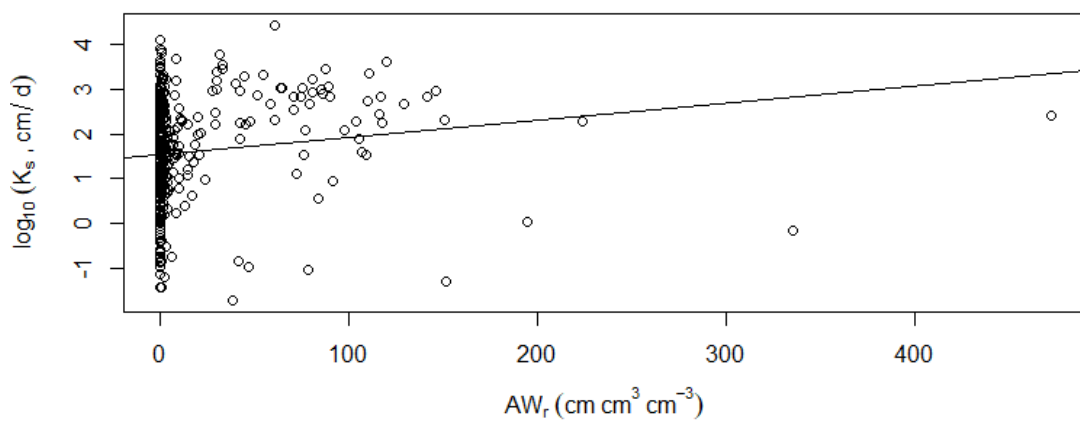
Fonte: do autor (2022).

Figura 11 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_r para as texturas agrupadas (N = 395).



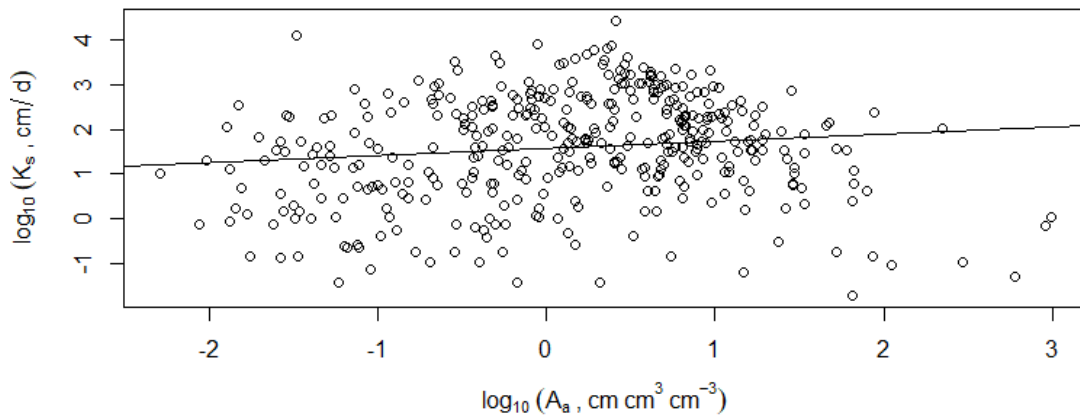
Fonte: do autor (2022).

Figura 12 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e AW_r para as texturas agrupadas (N = 395).



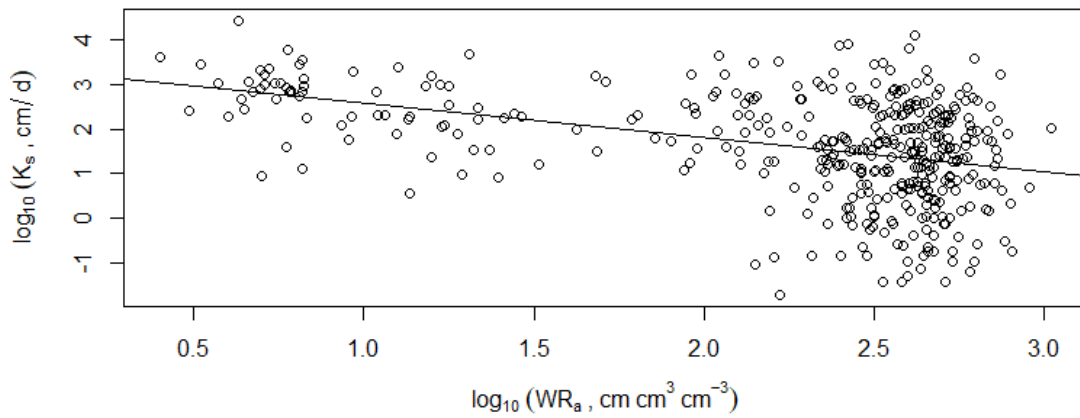
Fonte: do autor (2022).

Figura 13 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $\log_{10}A_a$ para as texturas agrupadas (N = 395).



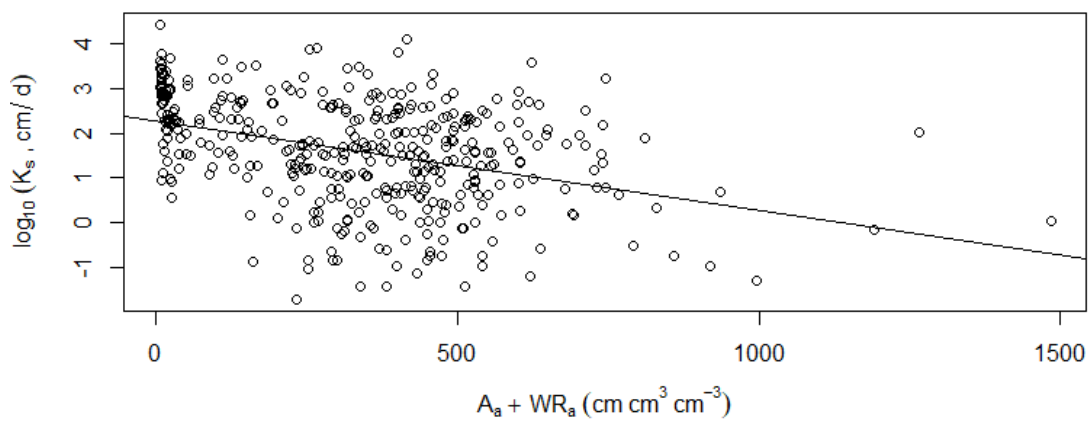
Fonte: do autor (2022).

Figura 14 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $\log_{10}WR_a$ para as texturas agrupadas (N = 395).



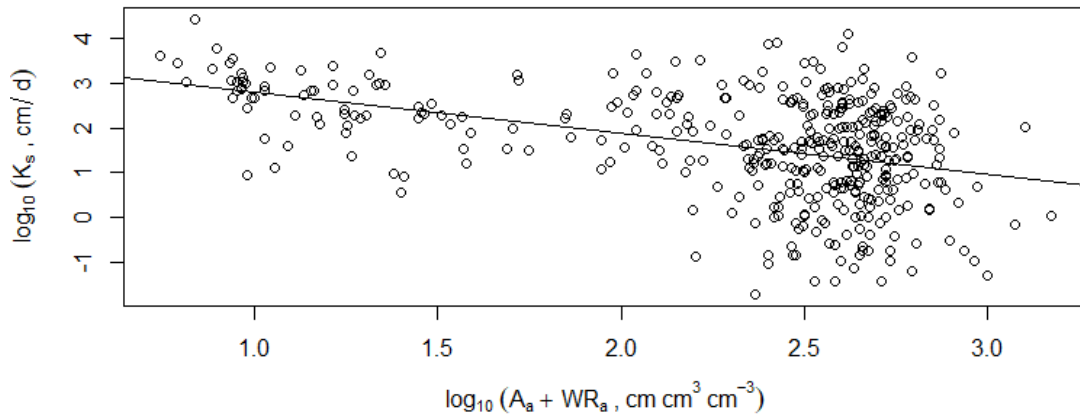
Fonte: do autor (2022).

Figura 15 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $A_a + WR_a$ para as texturas agrupadas (N = 395).



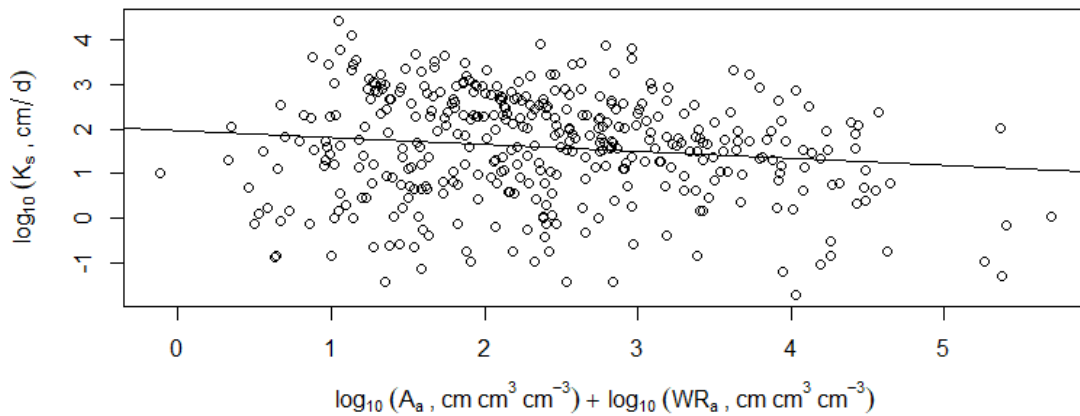
Fonte: do autor (2022).

Figura 16 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $\log_{10}(A_a+WR_a)$ para as texturas agrupadas (N = 395).



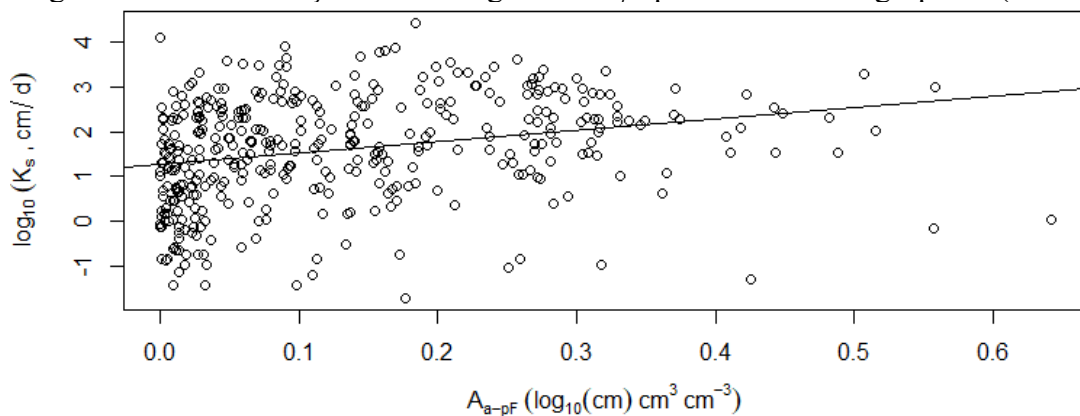
Fonte: do autor (2022).

Figura 17 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $\log_{10}A_a+\log_{10}WR_a$ para as texturas agrupadas (N = 395).



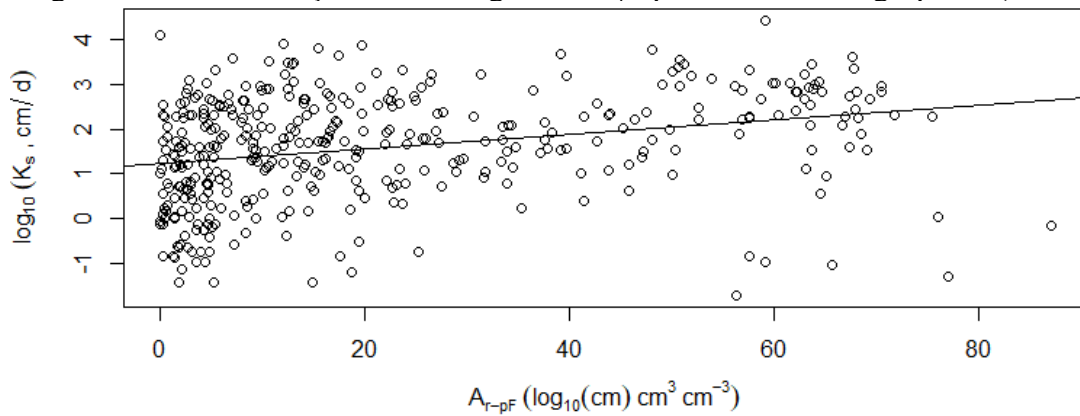
Fonte: do autor (2022).

Figura 18 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_{a-pF} para as texturas agrupadas (N = 395).



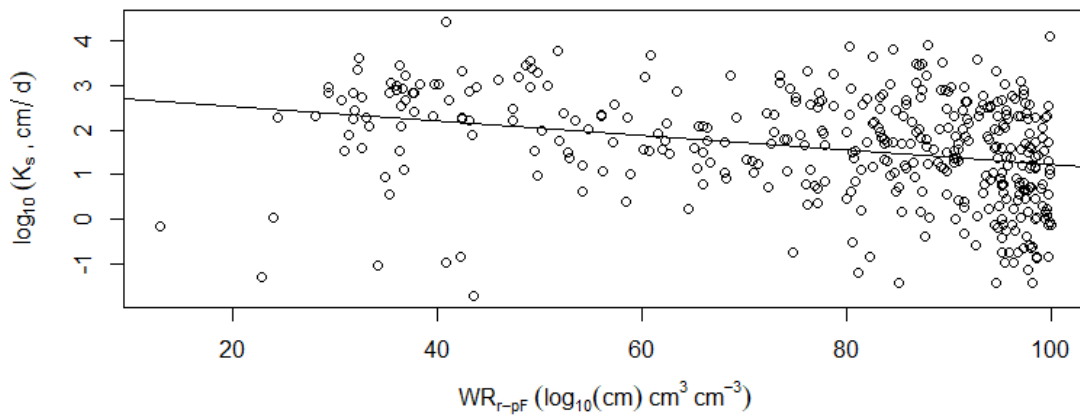
Fonte: do autor (2022).

Figura 19 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_{r-pF} para as texturas agrupadas (N = 395).



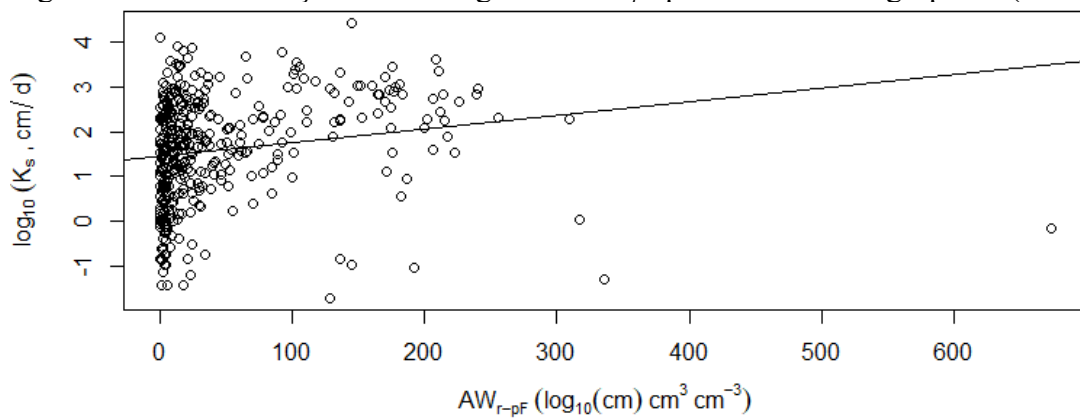
Fonte: do autor (2022).

Figura 20 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_{r-pF} para as texturas agrupadas (N = 395).



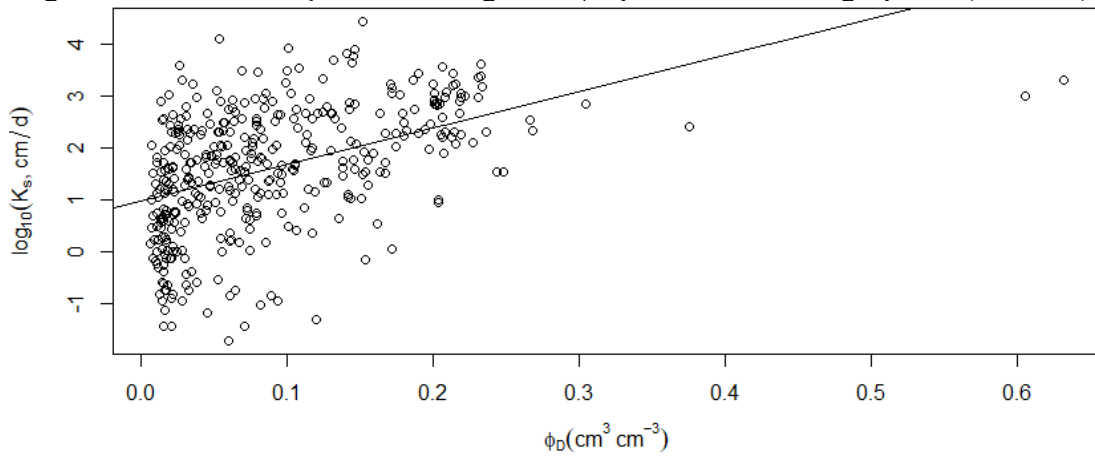
Fonte: do autor (2022).

Figura 21 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e AW_{r-pF} para as texturas agrupadas (N = 395).



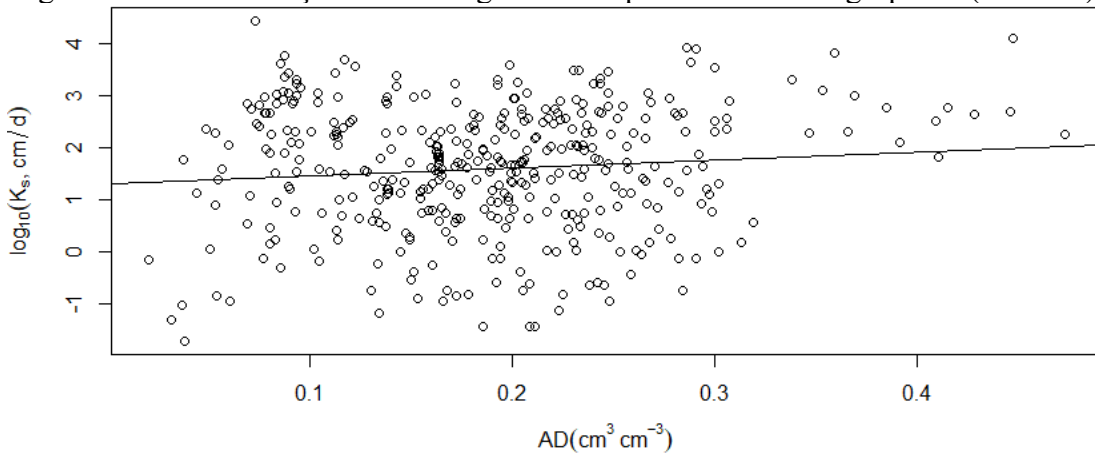
Fonte: do autor (2022).

Figura 22 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e ϕ_D para as texturas agrupadas (N = 395).



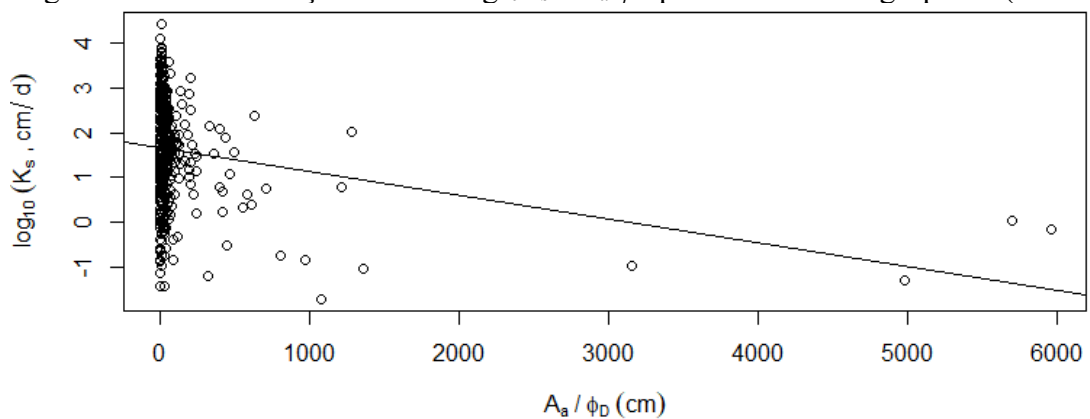
Fonte: do autor (2022).

Figura 23 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e AD para as texturas agrupadas (N = 395).



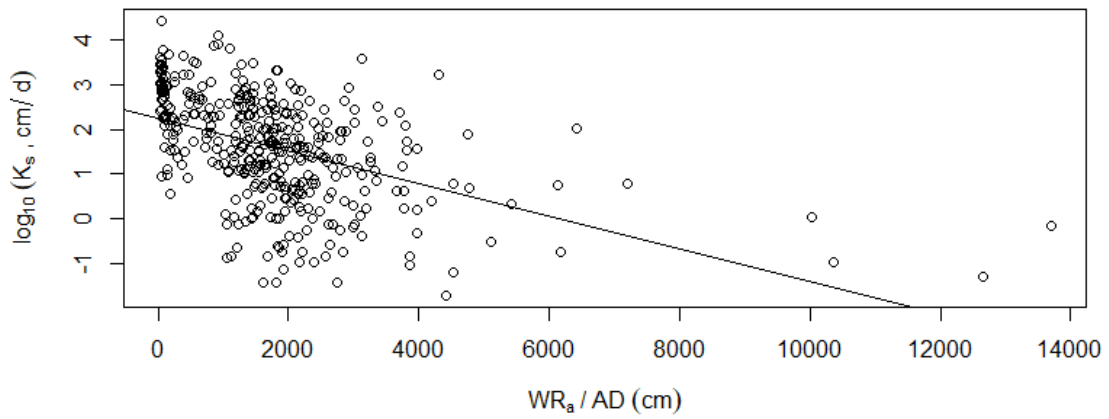
Fonte: do autor (2022).

Figura 24 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_a/ϕ_D para as texturas agrupadas (N = 395).



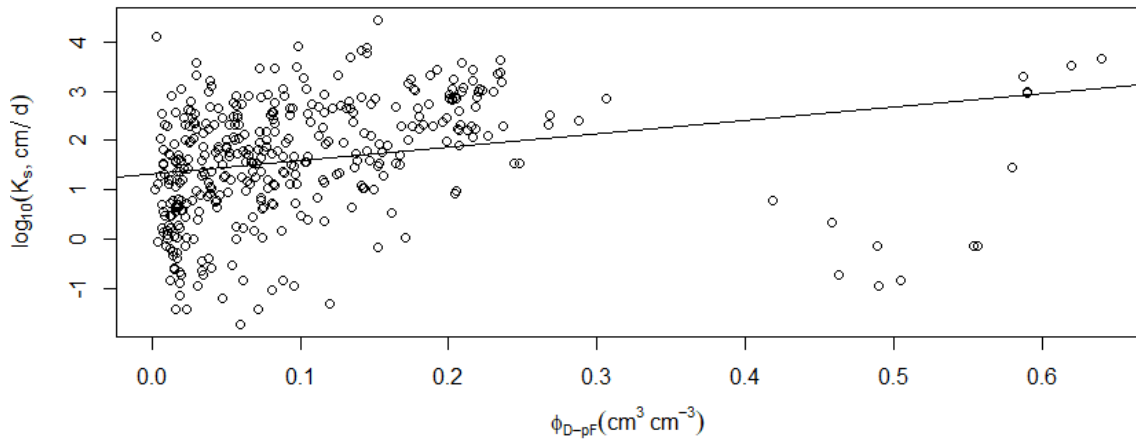
Fonte: do autor (2022).

Figura 25 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_a/AD para as texturas agrupadas (N = 395).



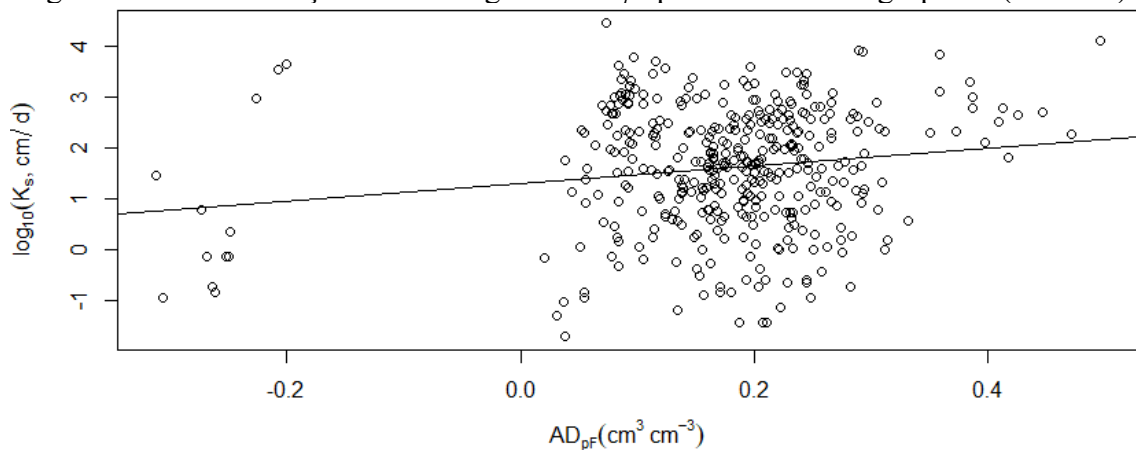
Fonte: do autor (2022).

Figura 26 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e ϕ_{D-pF} para as texturas agrupadas (N = 395).



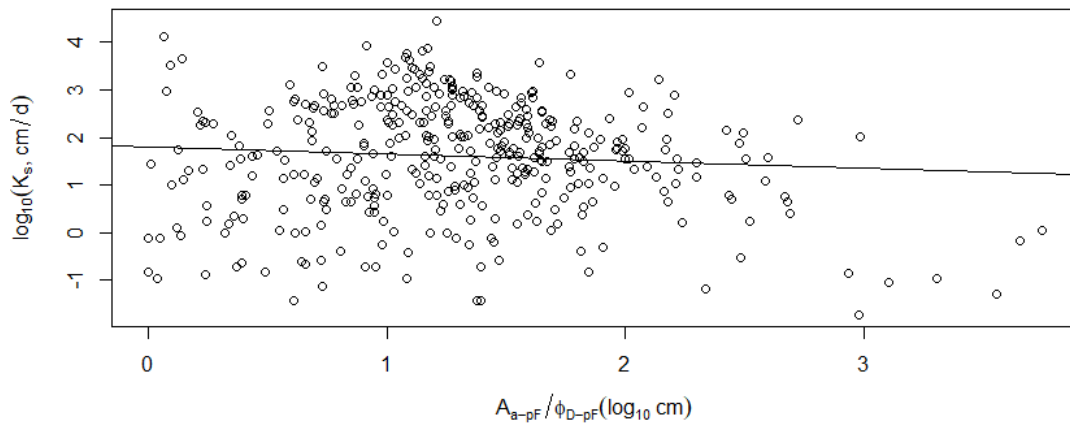
Fonte: do autor (2022).

Figura 27 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e AD_{pF} para as texturas agrupadas (N = 395).



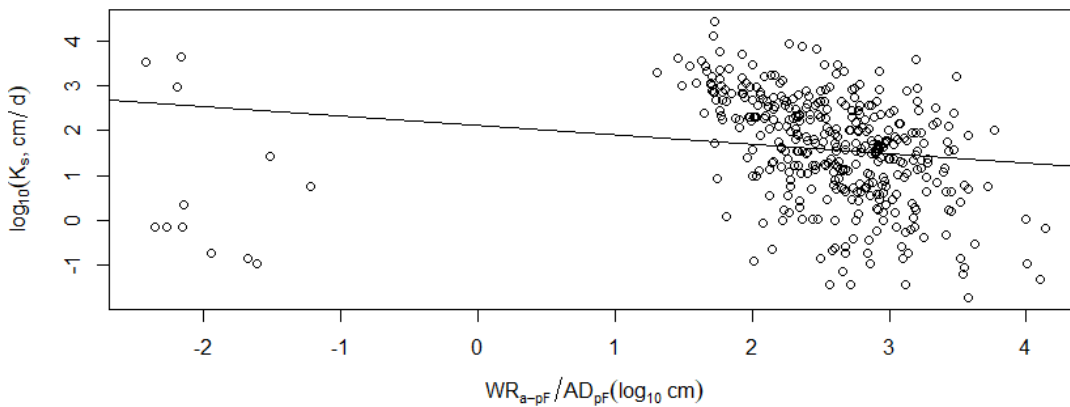
Fonte: do autor (2022).

Figura 28 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_{a-pF}/ϕ_{D-pF} para as texturas agrupadas (N = 395).



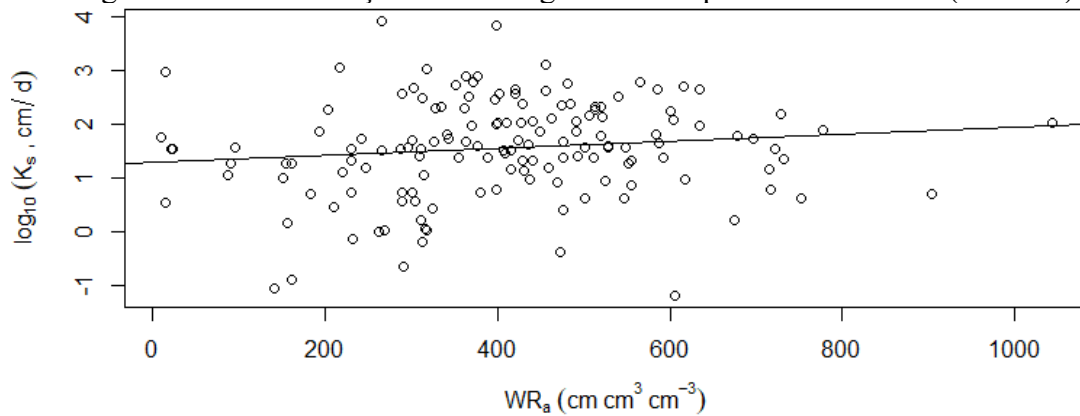
Fonte: do autor (2022).

Figura 29 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_{a-pF}/AD_{pF} para as texturas agrupadas (N = 395).



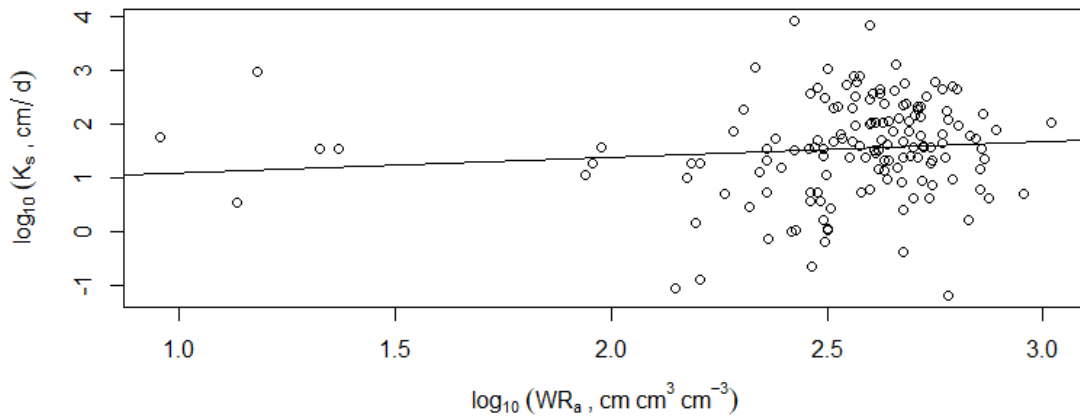
Fonte: do autor (2022).

Figura 30 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_a para textura média (N = 147).



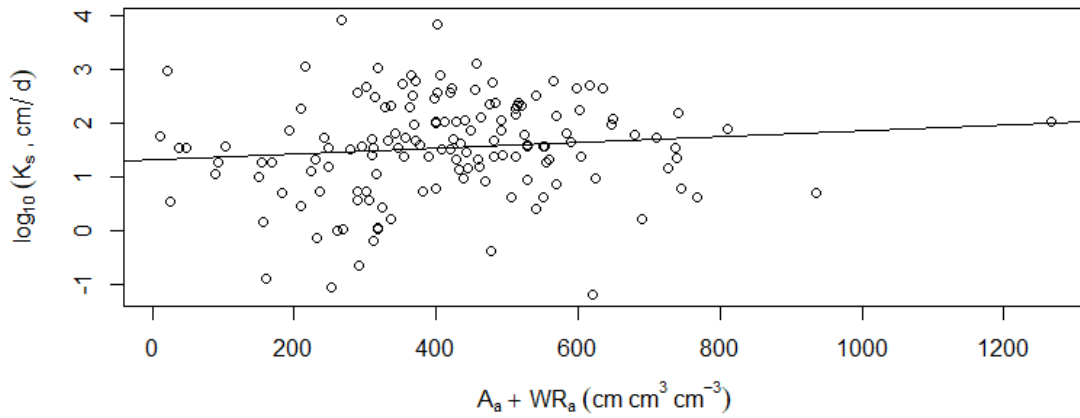
Fonte: do autor (2022).

Figura 31- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $\log_{10}WR_a$ para textura média (N = 147).



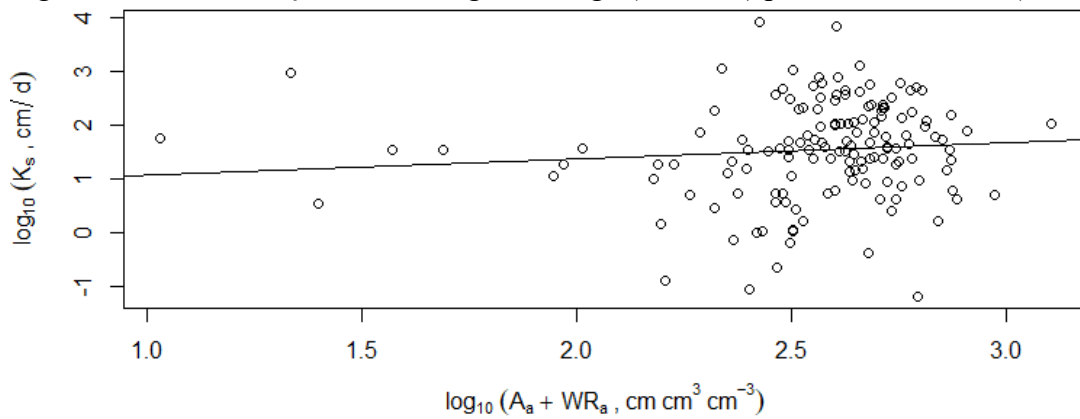
Fonte: do autor (2022).

Figura 32 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_a+WR_a para textura média (N = 147).



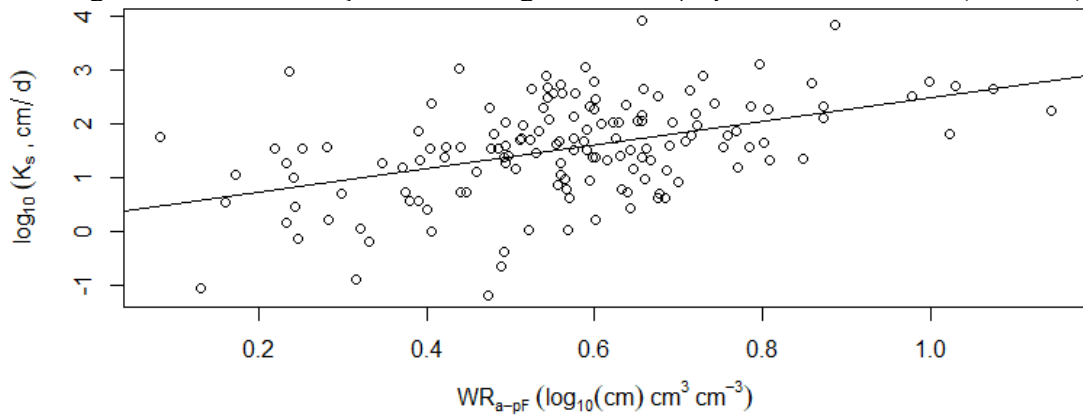
Fonte: do autor (2022).

Figura 33- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $\log_{10}(A_a+WR_a)$ para textura média (N = 147).



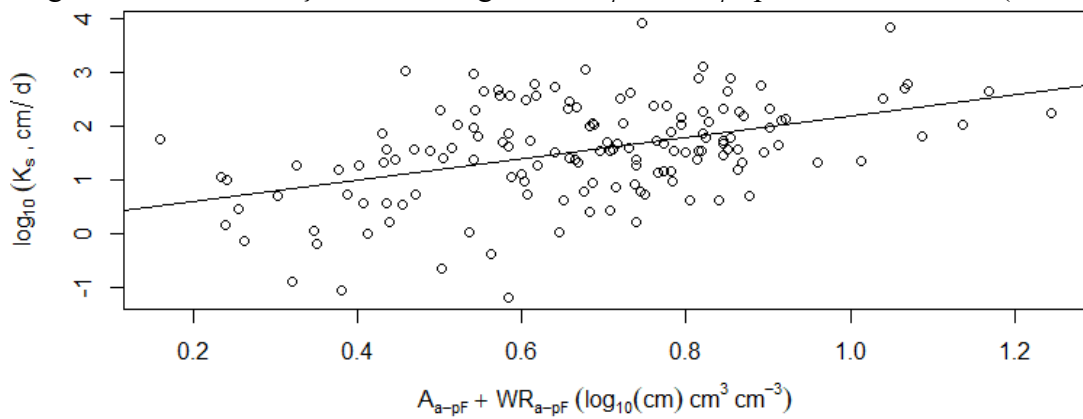
Fonte: do autor (2022).

Figura 34- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_{a-pF} para textura média (N = 147).



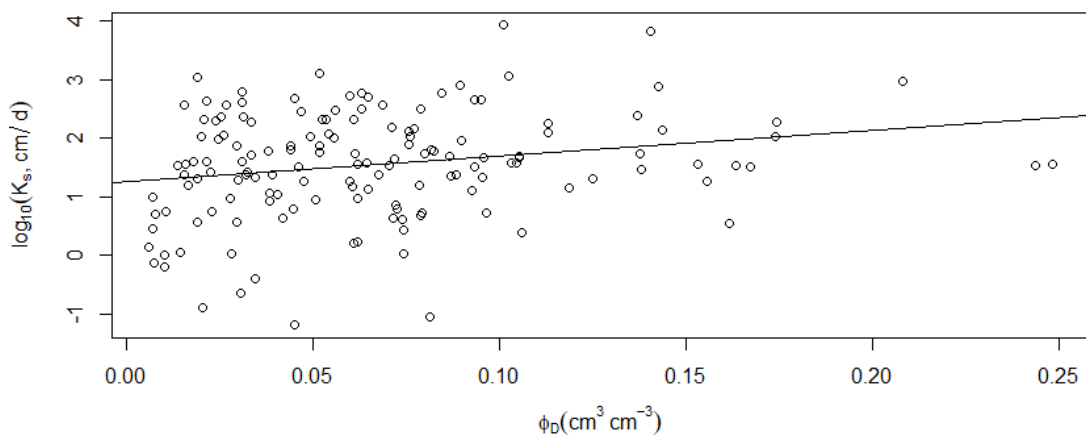
Fonte: do autor (2022).

Figura 35- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $A_{a-pF} + WR_{a-pF}$ para textura média (N = 147).



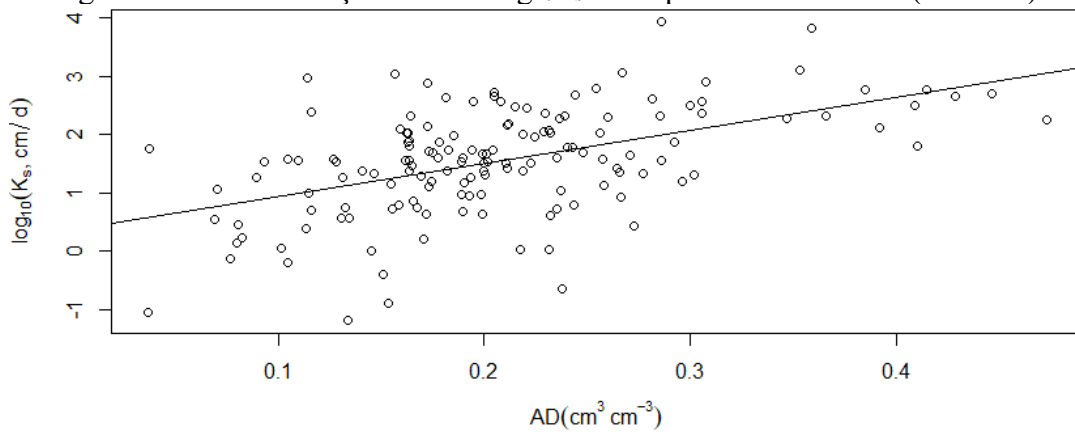
Fonte: do autor (2022).

Figura 36 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e ϕ_D para textura média (N = 147).



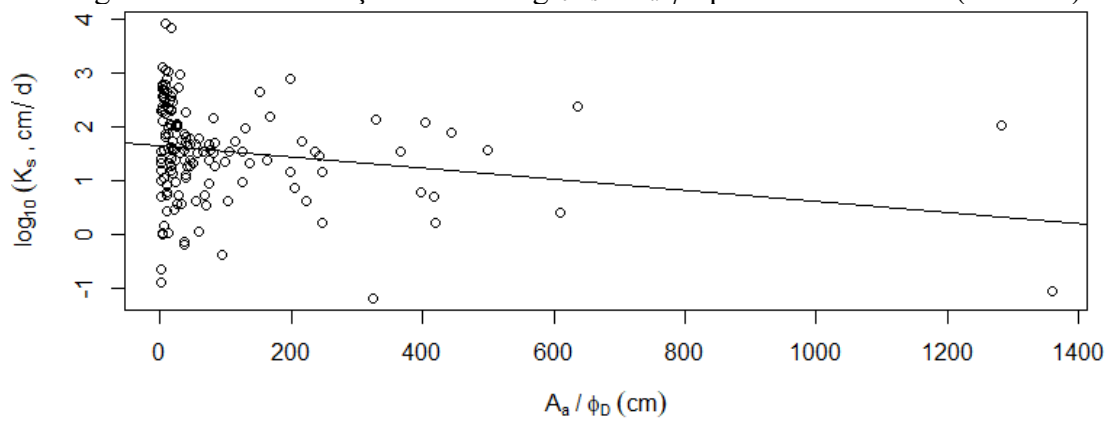
Fonte: do autor (2022).

Figura 37 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e AD para textura média (N = 147).



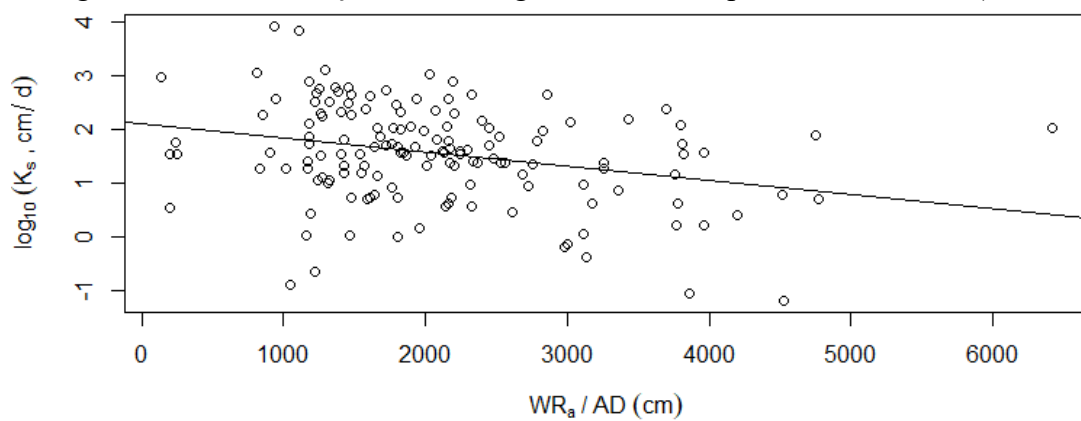
Fonte: do autor (2022).

Figura 38 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_a/ϕ_D para textura média (N = 147).



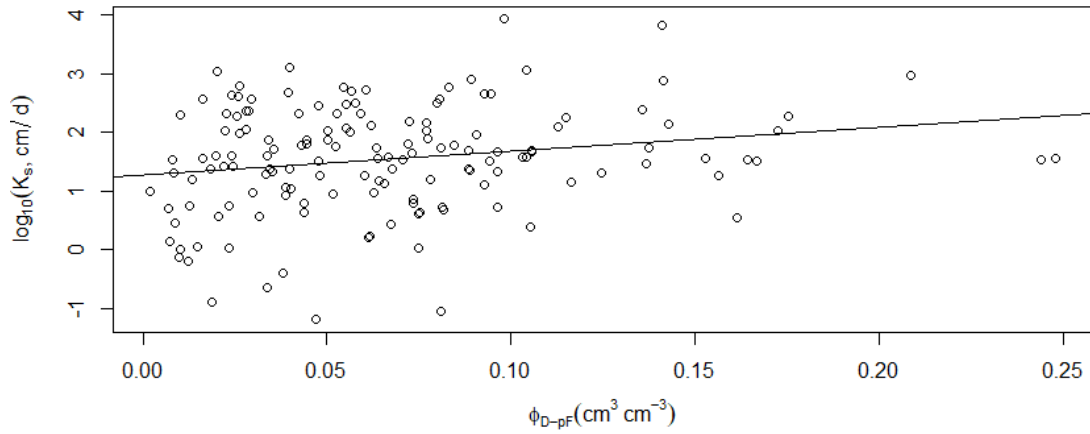
Fonte: do autor (2022).

Figura 39 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_a/AD para textura média (N = 147).



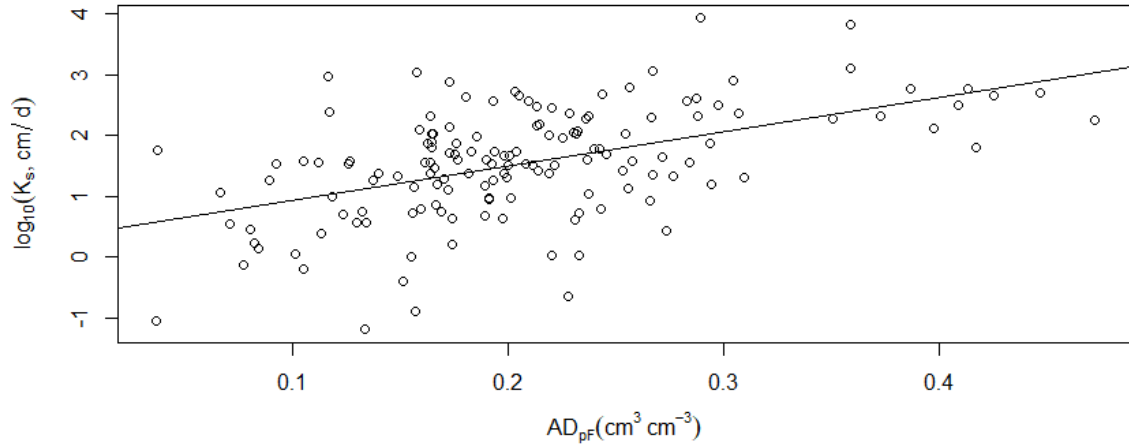
Fonte: do autor (2022).

Figura 40 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e ϕ_{D-pF} para textura média (N = 147).



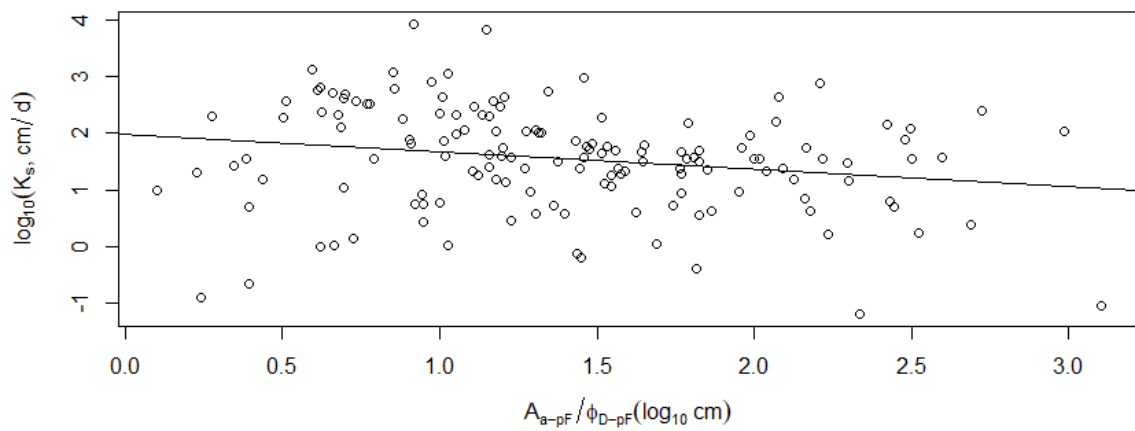
Fonte: do autor (2022).

Figura 41 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e AD_{pF} para textura média (N = 147).



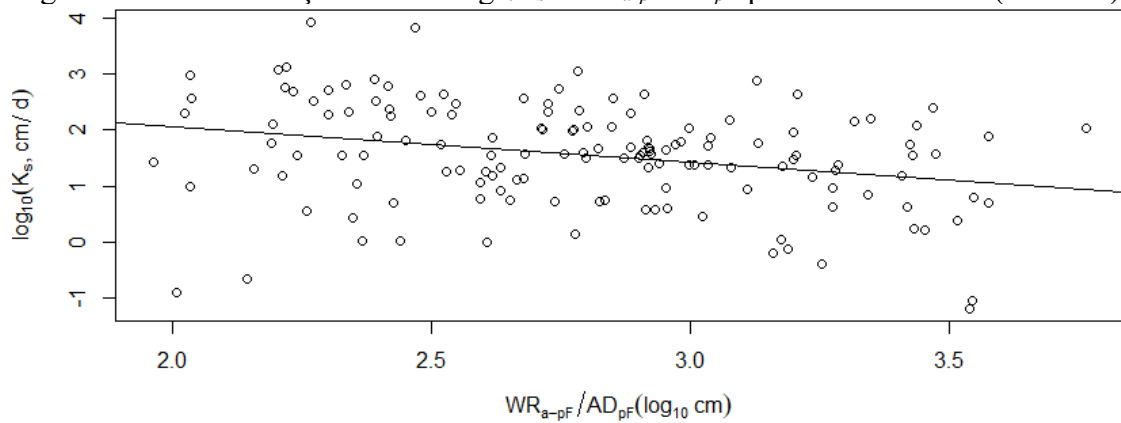
Fonte: do autor (2022).

Figura 42 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_{a-pF}/ϕ_{D-pF} para textura média (N = 147).



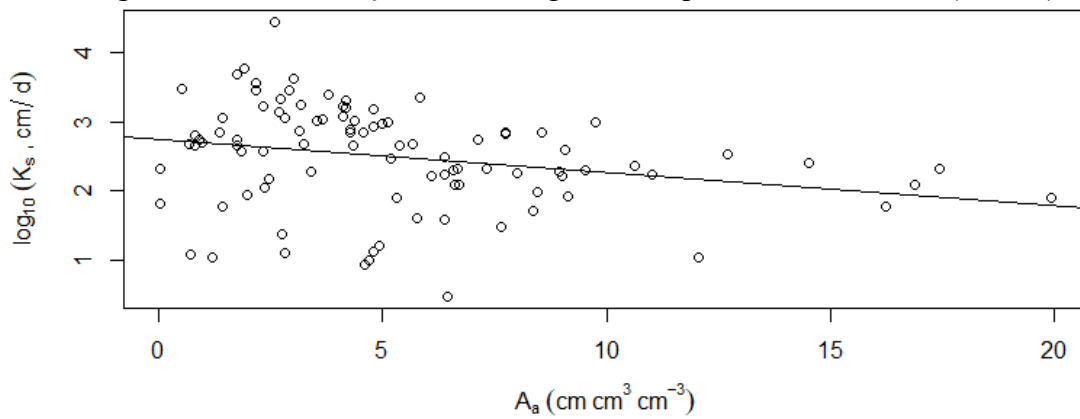
Fonte: do autor (2022).

Figura 43 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_{a-pF}/AD_{pF} para textura média (N = 147).



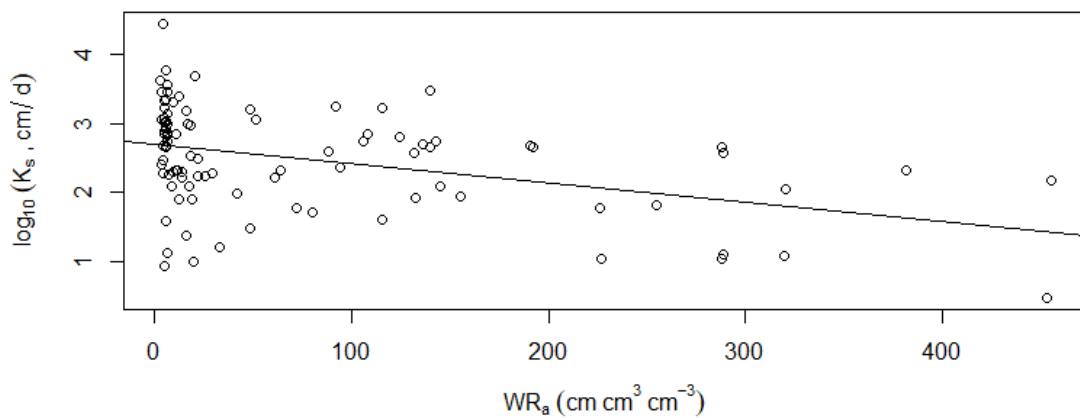
Fonte: do autor (2022).

Figura 44- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_a para textura arenosa (N = 96).



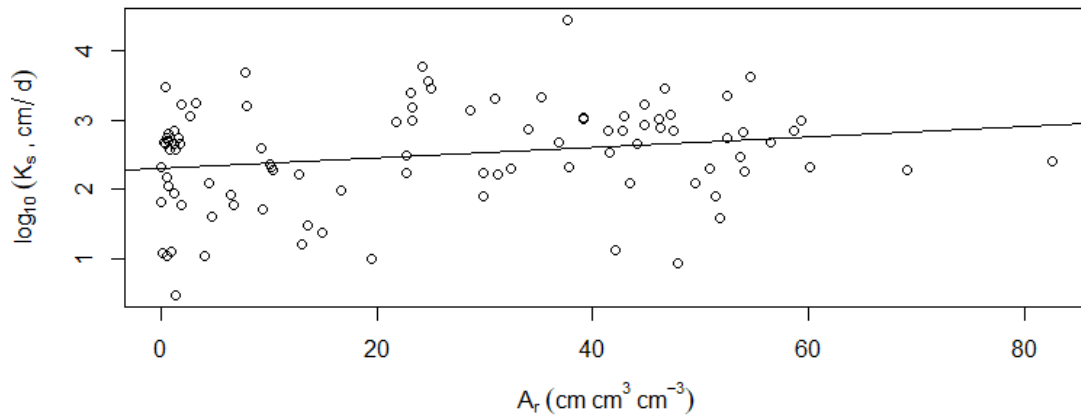
Fonte: do autor (2022).

Figura 45- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_a para textura arenosa (N = 96).



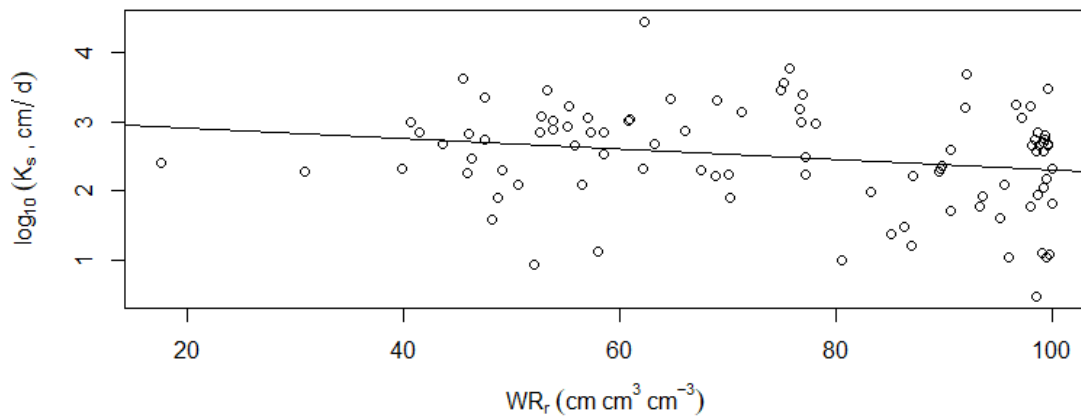
Fonte: do autor (2022).

Figura 46- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_r para textura arenosa (N = 96).



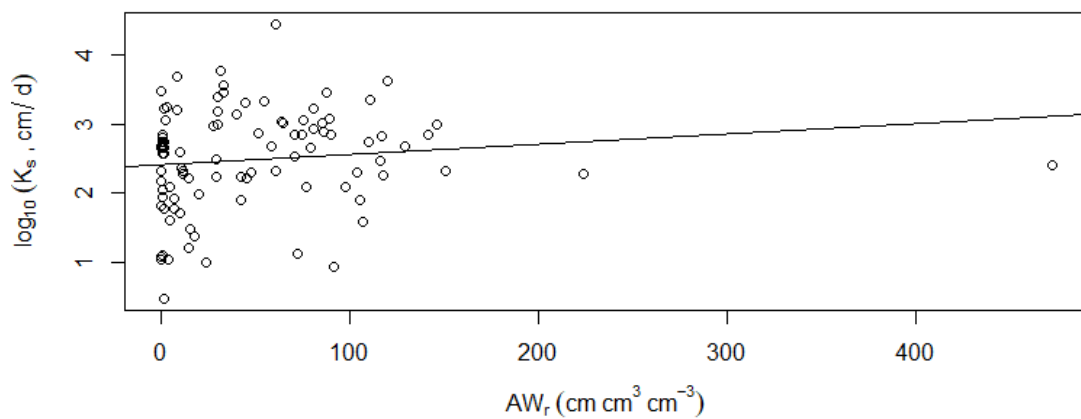
Fonte: do autor (2022).

Figura 47- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_r para textura arenosa (N = 96).



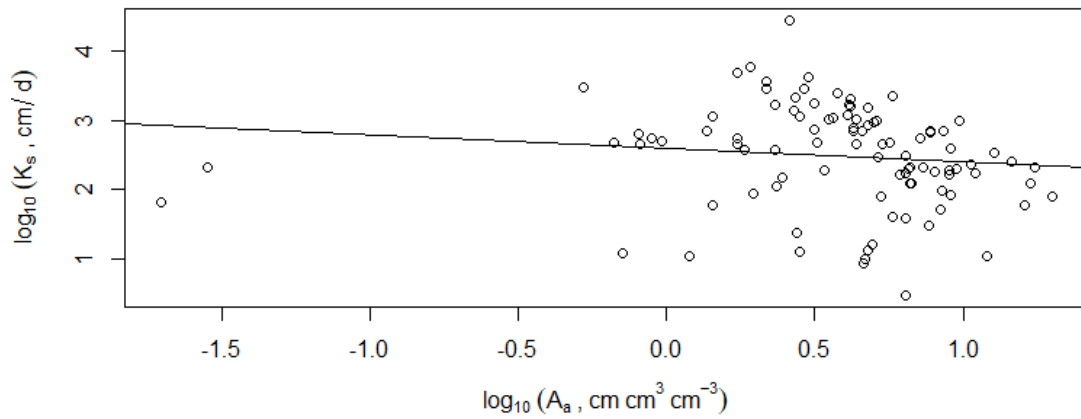
Fonte: do autor (2022).

Figura 48- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e AW_r para textura arenosa (N = 96).



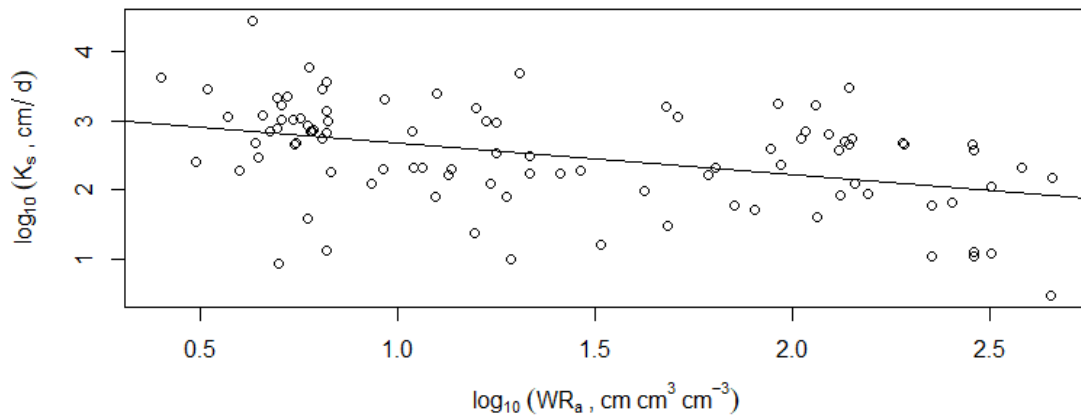
Fonte: do autor (2022).

Figura 49- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $\log_{10}A_a$ para textura arenosa (N = 96).



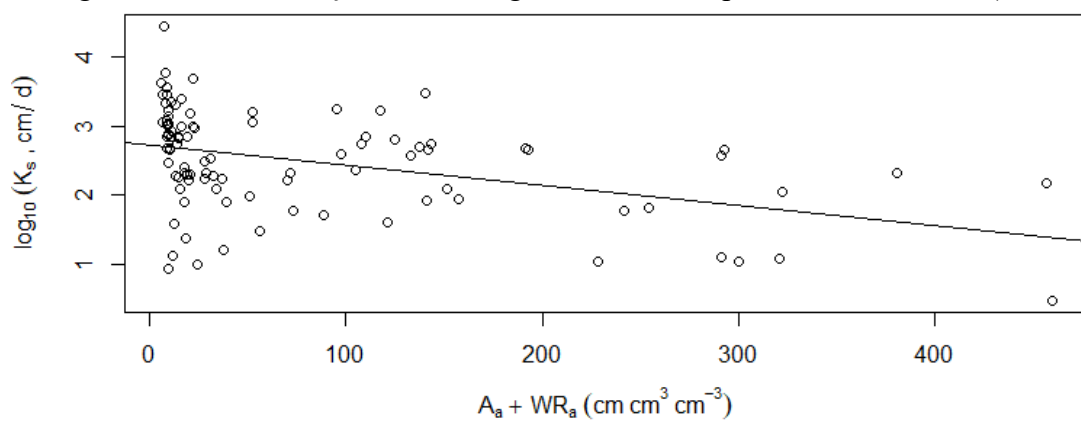
Fonte: do autor (2022).

Figura 50- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $\log_{10}WR_a$ para textura arenosa (N = 96).



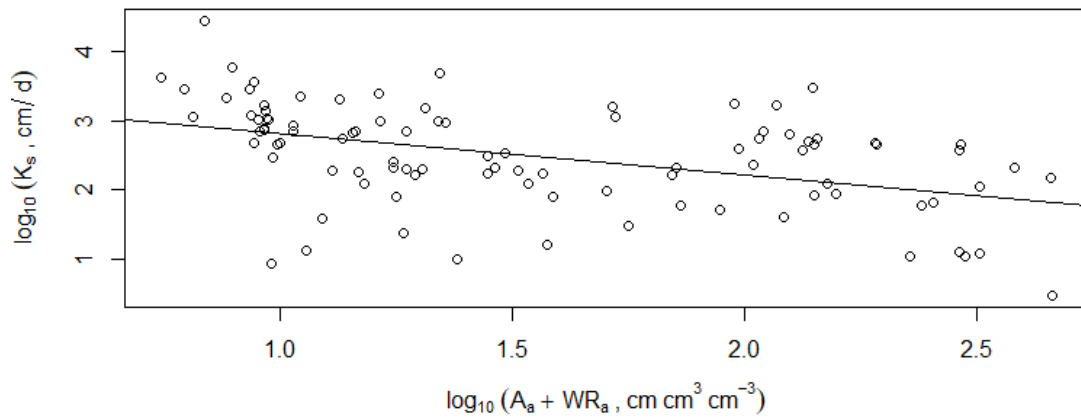
Fonte: do autor (2022).

Figura 51- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_a+WR_a para textura arenosa (N = 96).



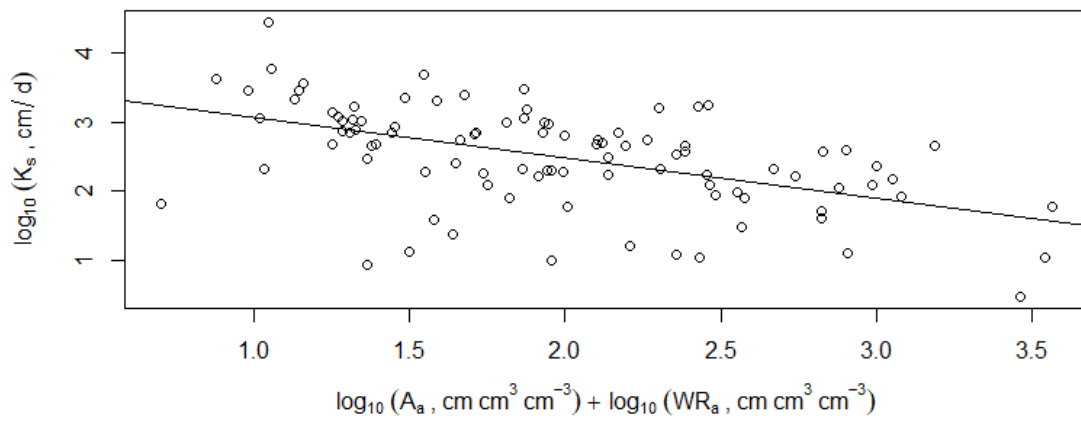
Fonte: do autor (2022).

Figura 52- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $\log_{10}(A_a+WR_a)$ para textura arenosa (N = 96).



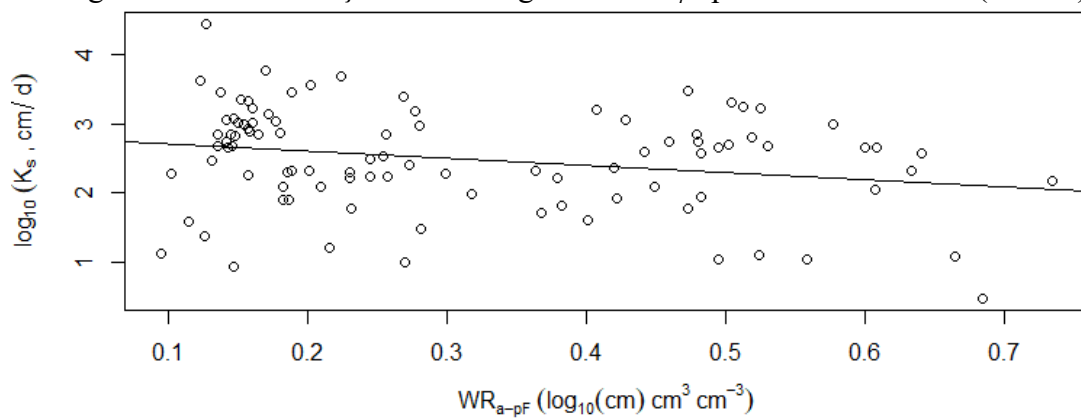
Fonte: do autor (2022).

Figura 53- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $\log_{10}A_a+\log_{10}WR_a$ para textura arenosa (N = 96).



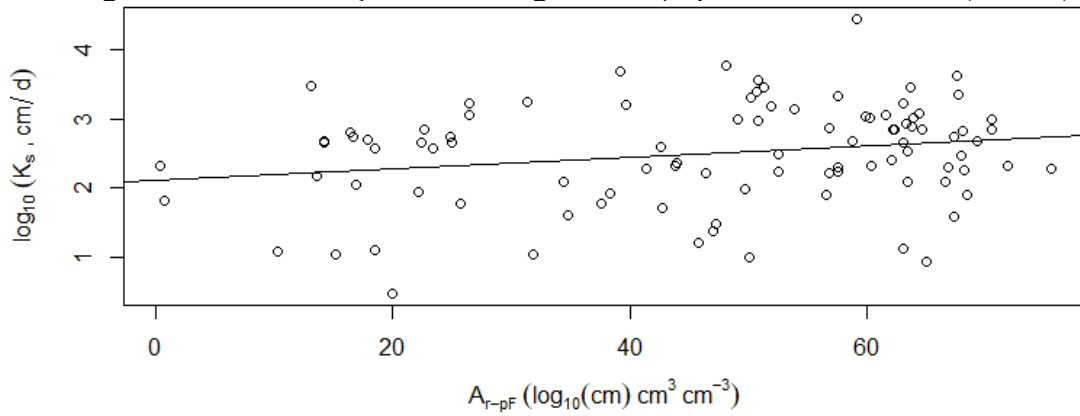
Fonte: do autor (2022).

Figura 54- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_{a-pF} para textura arenosa (N = 96).



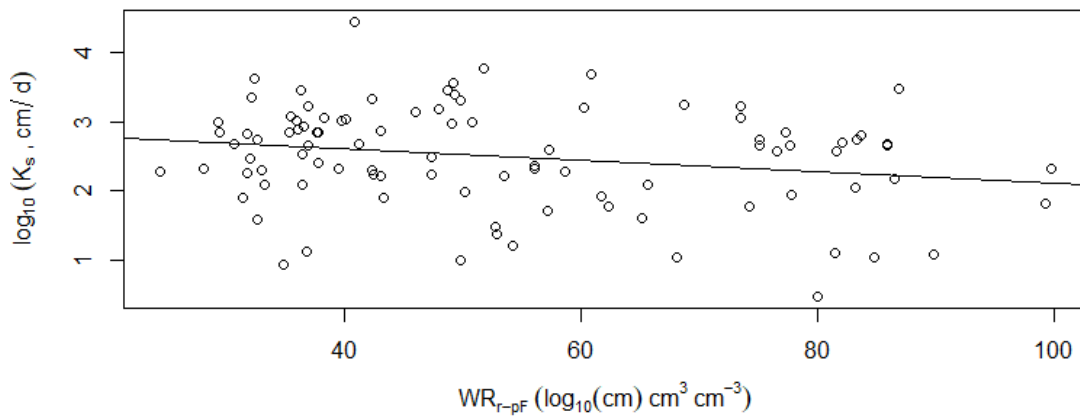
Fonte: do autor (2022).

Figura 55- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_{r-pF} para textura arenosa (N = 96).



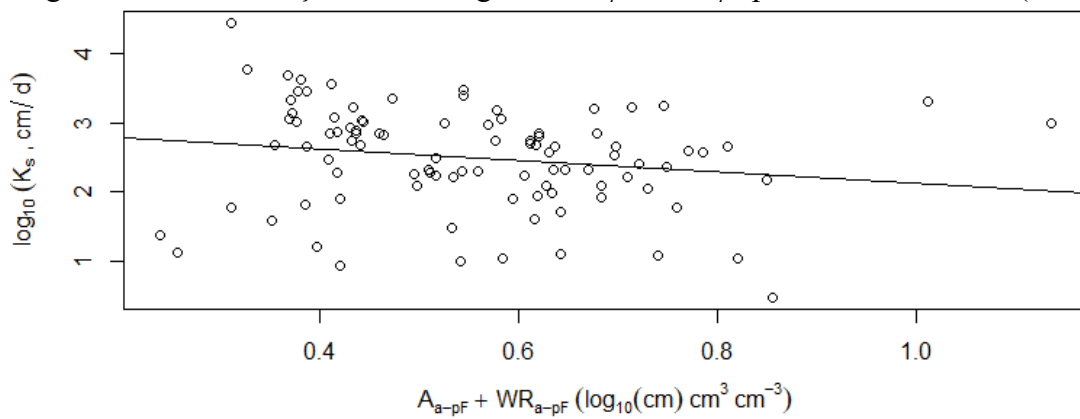
Fonte: do autor (2022).

Figura 56- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_{r-pF} para textura arenosa (N = 96).



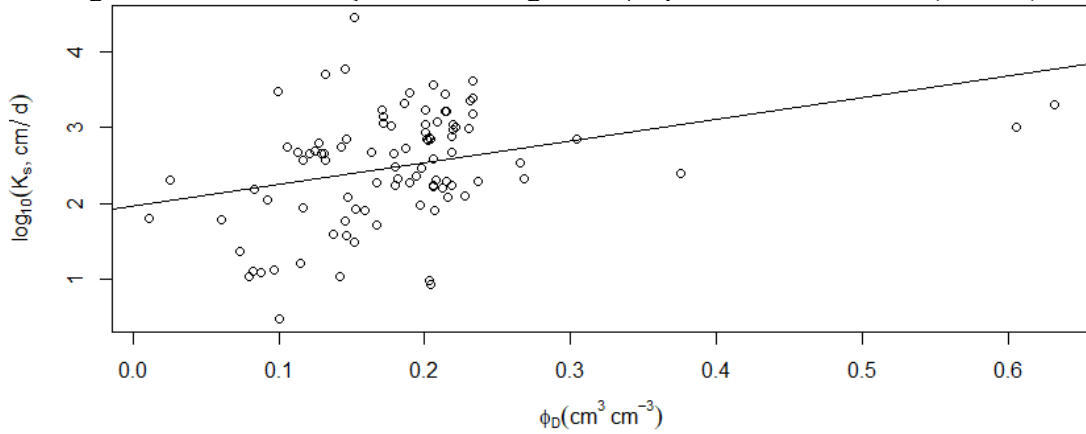
Fonte: do autor (2022).

Figura 57- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $A_{a-pF} + WR_{a-pF}$ para textura arenosa (N = 96).



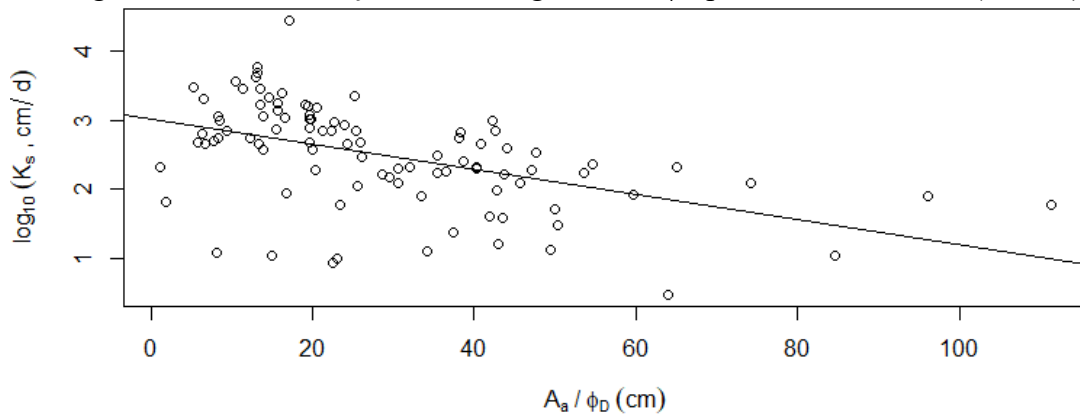
Fonte: do autor (2022).

Figura 58 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e ϕ_D para textura arenosa (N = 96).



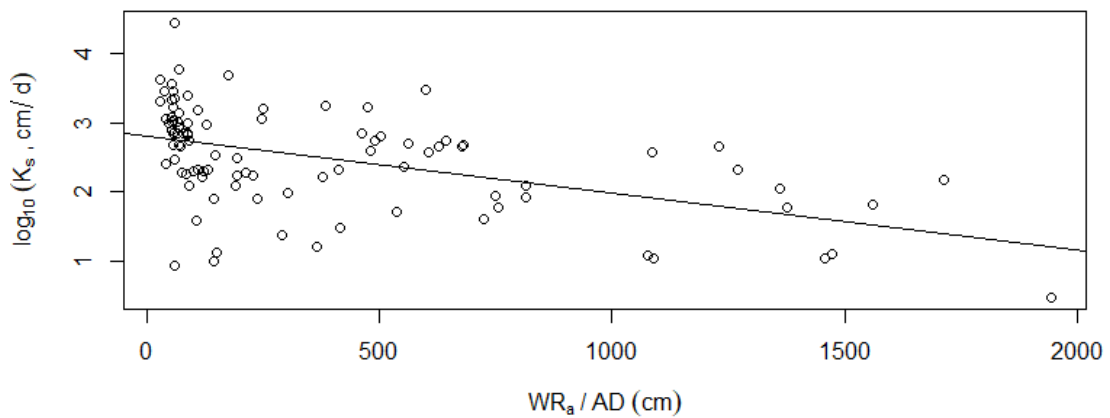
Fonte: do autor (2022).

Figura 59 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_a/ϕ_D para textura arenosa (N = 96).



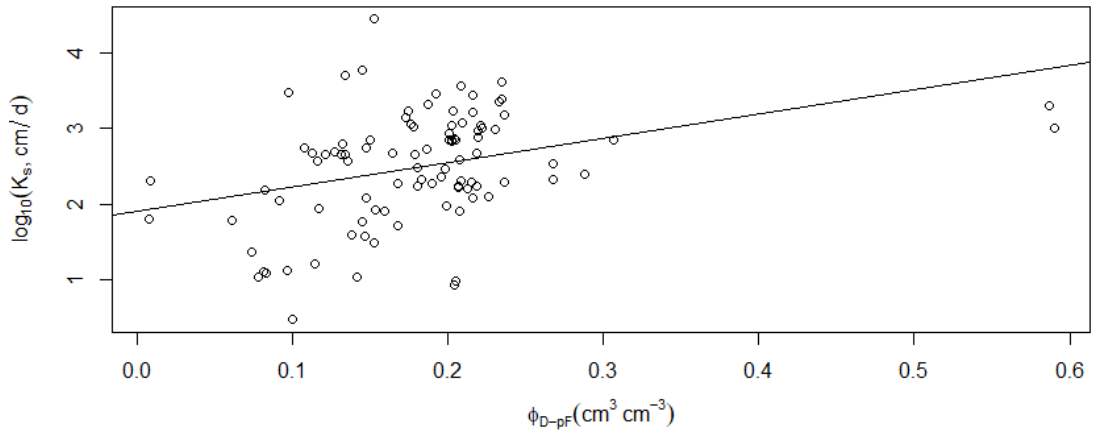
Fonte: do autor (2022).

Figura 60 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_a/AD para textura arenosa (N = 96).



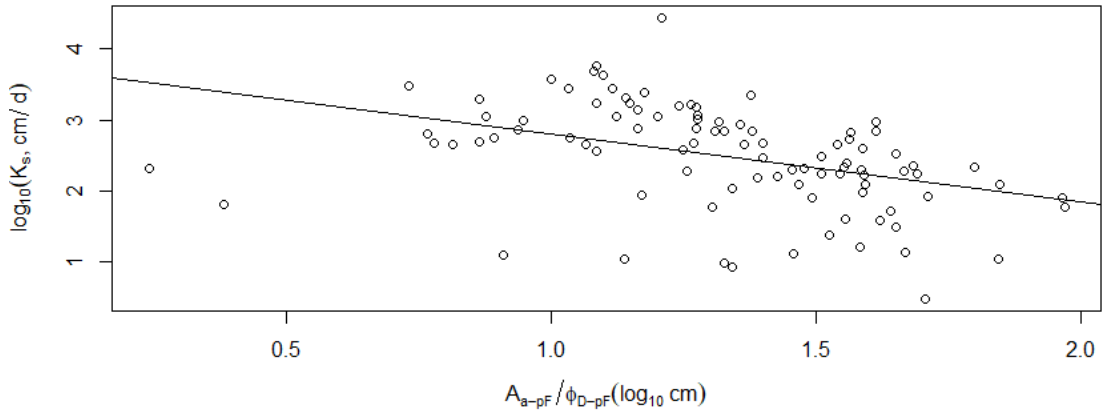
Fonte: do autor (2022).

Figura 61 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e ϕ_{D-pF} para textura arenosa (N = 96).



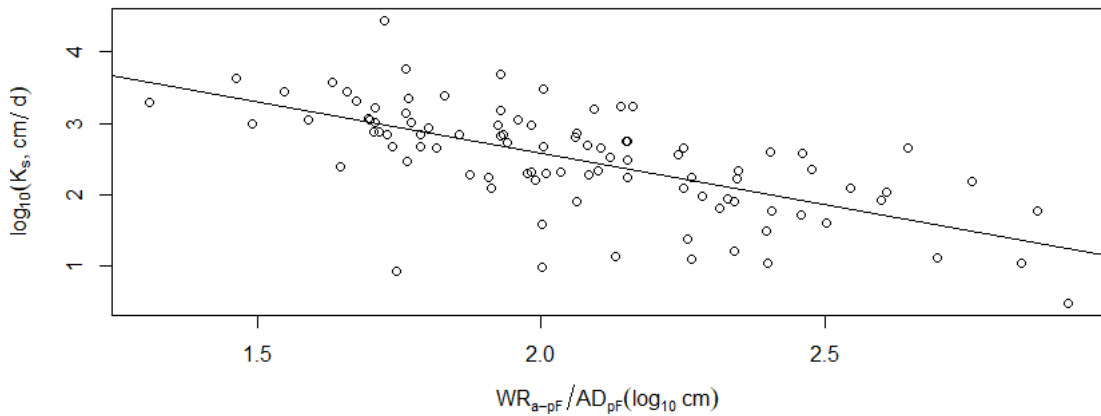
Fonte: do autor (2022).

Figura 62 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_{a-pF}/ϕ_{D-pF} para textura arenosa (N = 96).



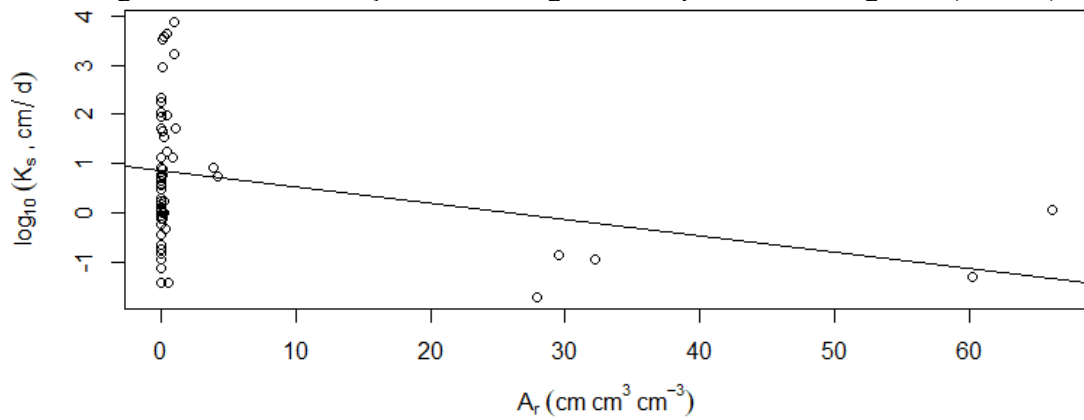
Fonte: do autor (2022).

Figura 63 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_{a-pF}/AD_{pF} para textura arenosa (N = 96).



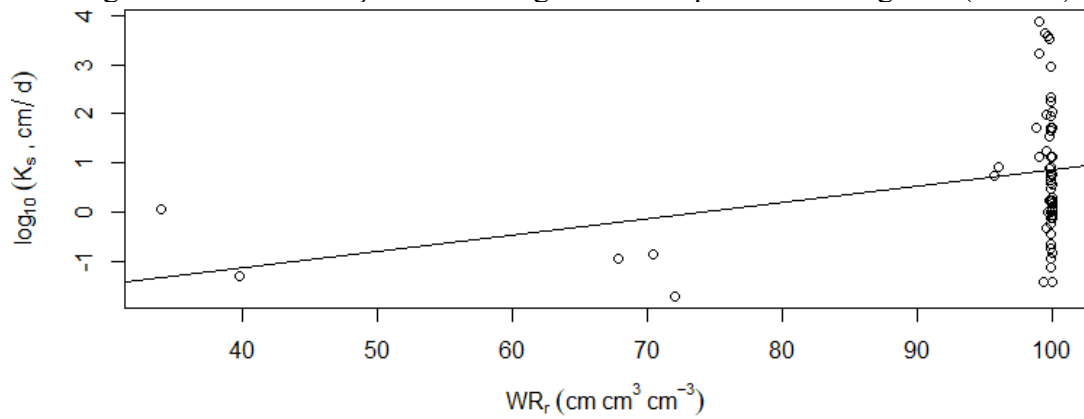
Fonte: do autor (2022).

Figura 64- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_r para textura argilosa (N = 61).



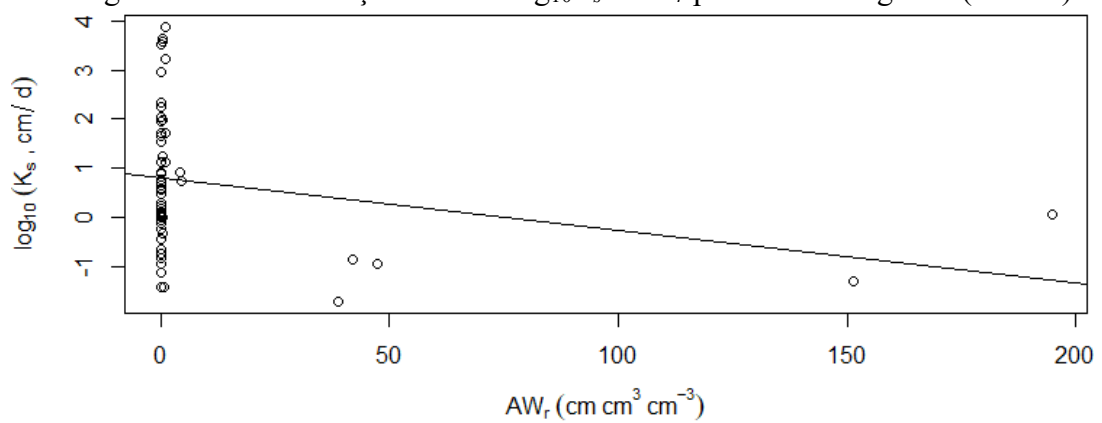
Fonte: do autor (2022).

Figura 65- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_r para textura argilosa (N = 61).



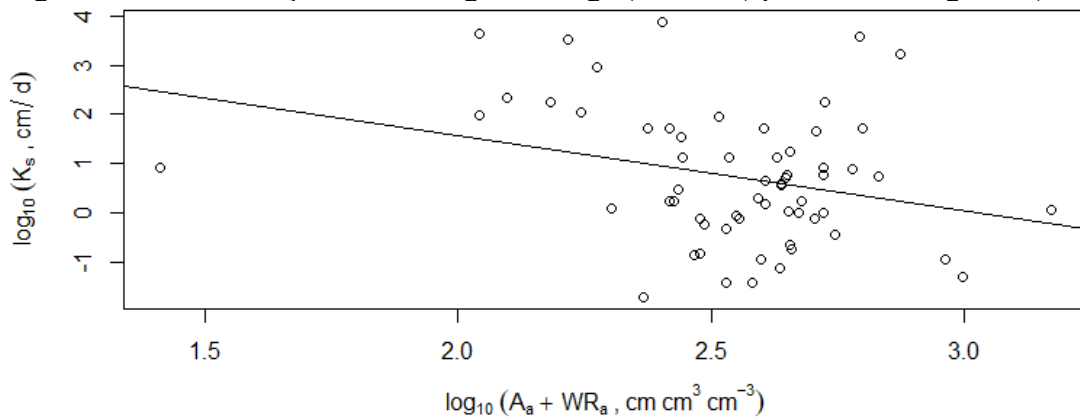
Fonte: do autor (2022).

Figura 66- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e AW_r para textura argilosa (N = 61).



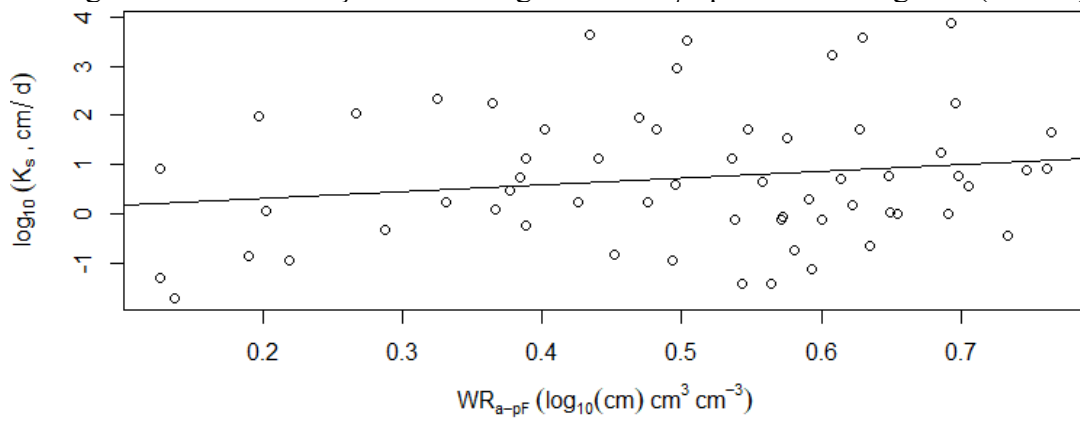
Fonte: do autor (2022).

Figura 67- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $\log_{10}(A_a+WR_a)$ para textura argilosa (N = 61).



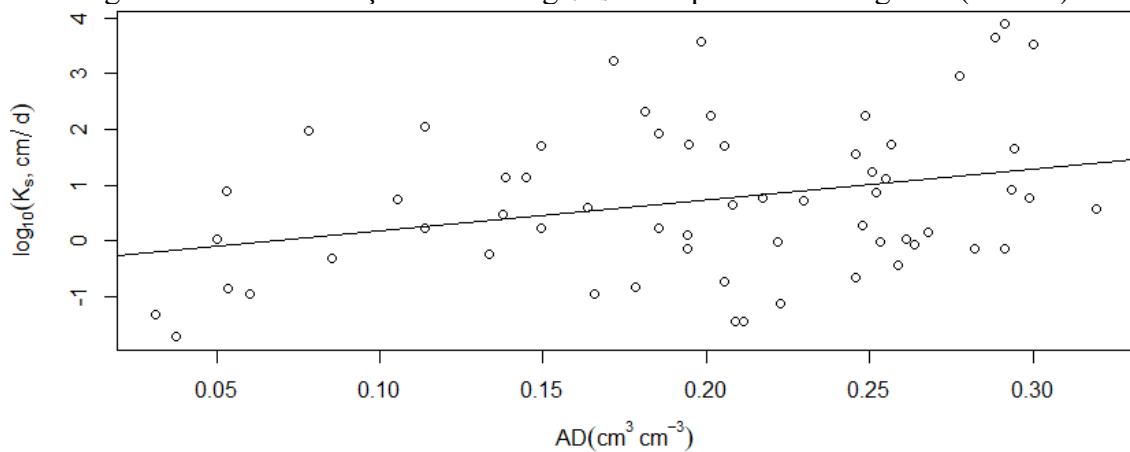
Fonte: do autor (2022).

Figura 68- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_{a-pF} para textura argilosa (N = 61).



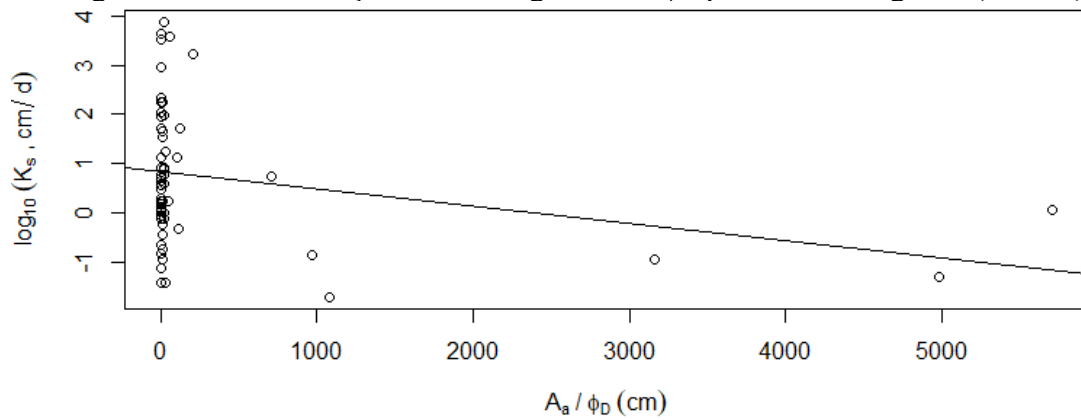
Fonte: do autor (2022).

Figura 69 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e AD para textura argilosa (N = 61).



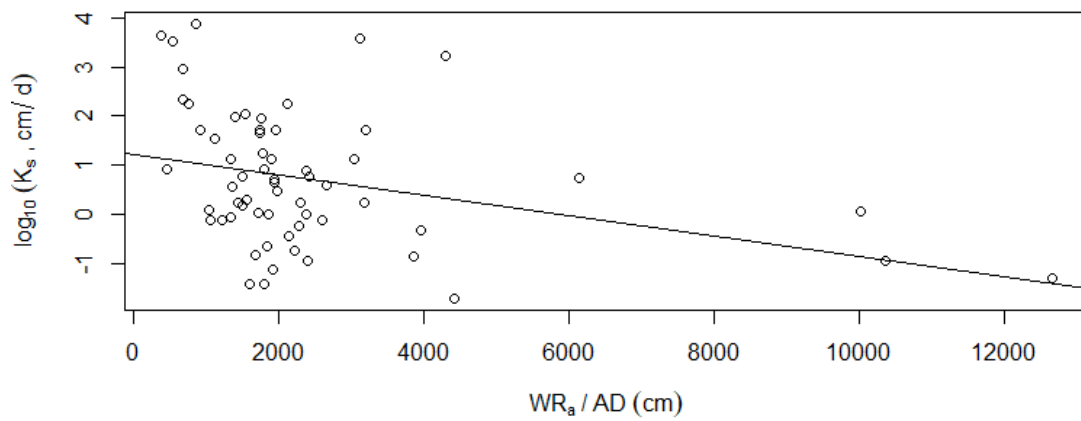
Fonte: do autor (2022).

Figura 70 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_a/ϕ_D para textura argilosa (N = 61).



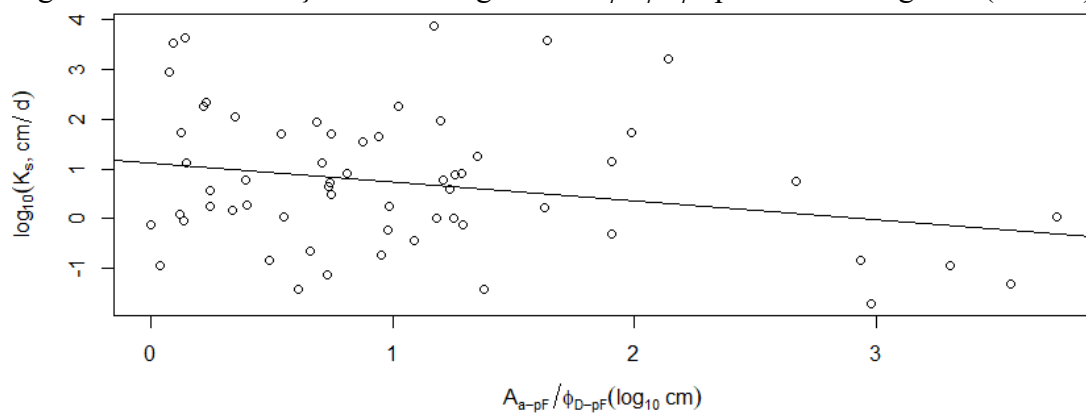
Fonte: do autor (2022).

Figura 71 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_a/AD para textura argilosa (N = 61).



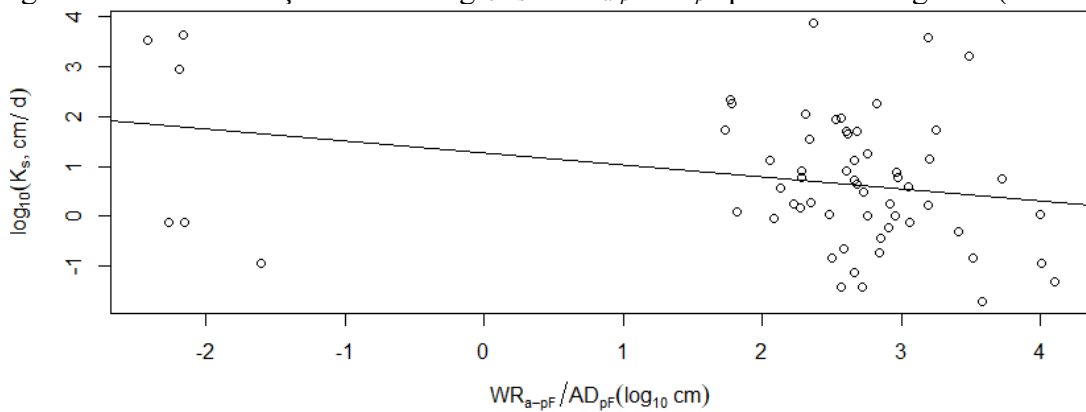
Fonte: do autor (2022).

Figura 72 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_{a-pF}/ϕ_{D-pF} para textura argilosa (N = 61).



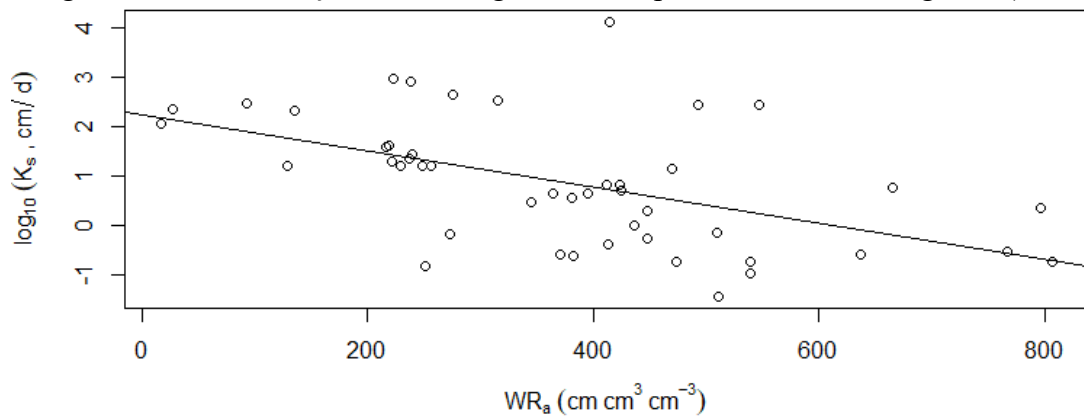
Fonte: do autor (2022).

Figura 73 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_{a-pF}/AD_{pF} para textura argilosa (N = 61).



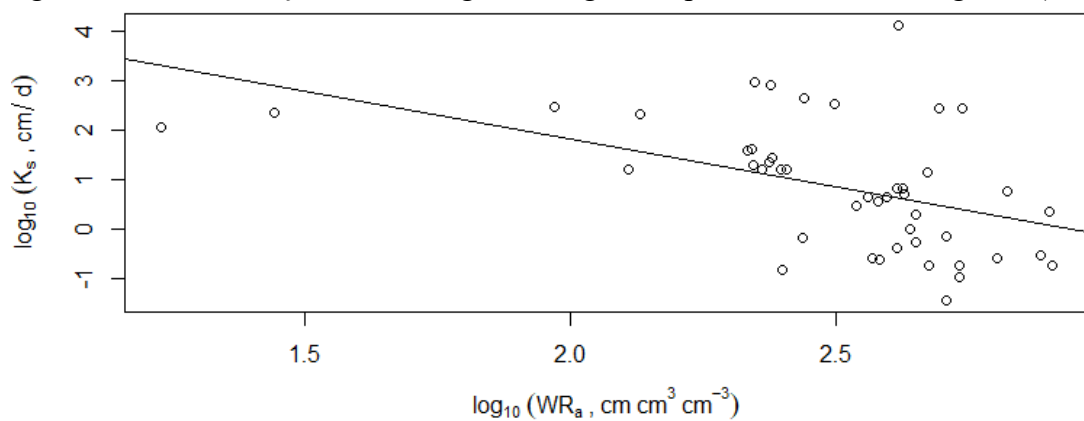
Fonte: do autor (2022).

Figura 74- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_a para textura muito argilosa (N = 46).



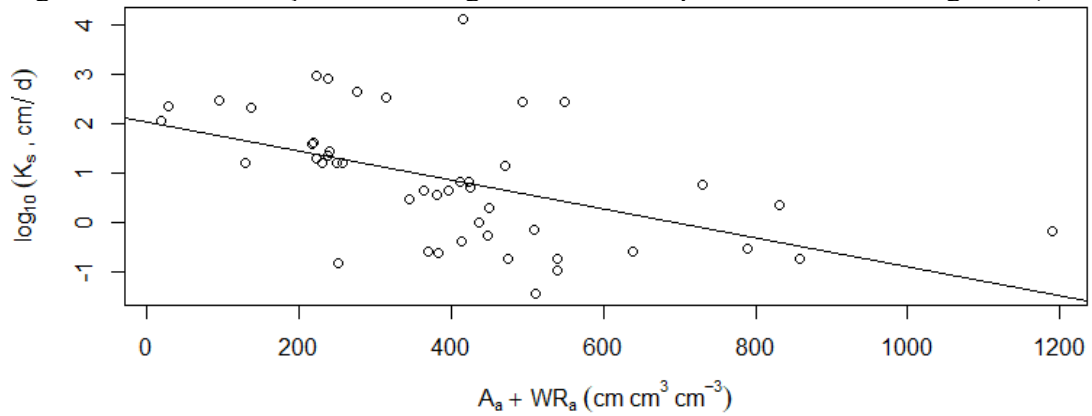
Fonte: do autor (2022).

Figura 75- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $\log_{10}WR_a$ para textura muito argilosa (N = 46).



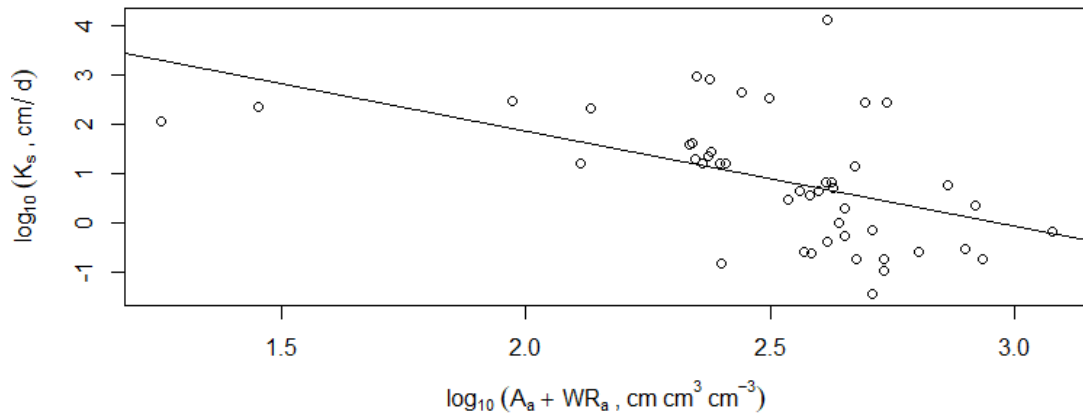
Fonte: do autor (2022).

Figura 76- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_a+WR_a para textura muito argilosa (N = 46).



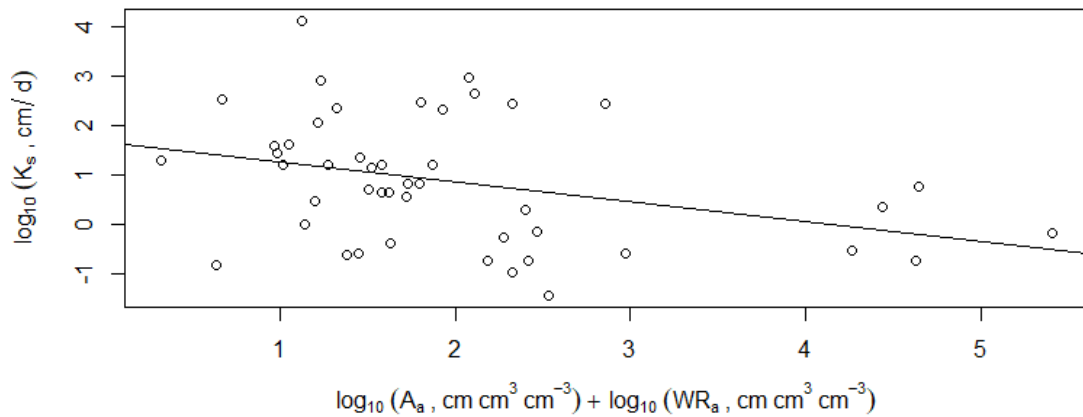
Fonte: do autor (2022).

Figura 77- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $\log_{10}(A_a+WR_a)$ para textura muito argilosa (N = 46).



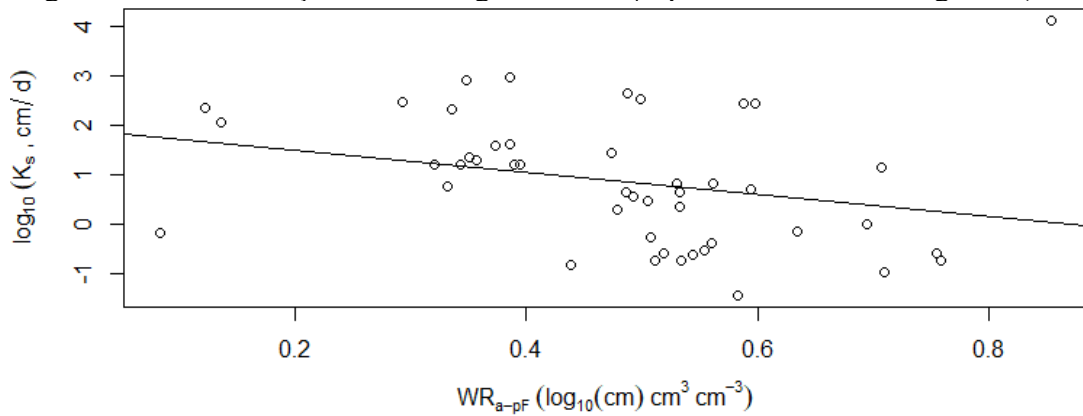
Fonte: do autor (2022).

Figura 78- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $\log_{10}A_a+\log_{10}WR_a$ para textura muito argilosa (N = 46).



Fonte: do autor (2022).

Figura 79- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_{a-pF} para textura muito argilosa (N = 46).



Fonte: do autor (2022).

Figura 80- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $A_{a-pF} + WR_{a-pF}$ para textura muito argilosa (N = 46).

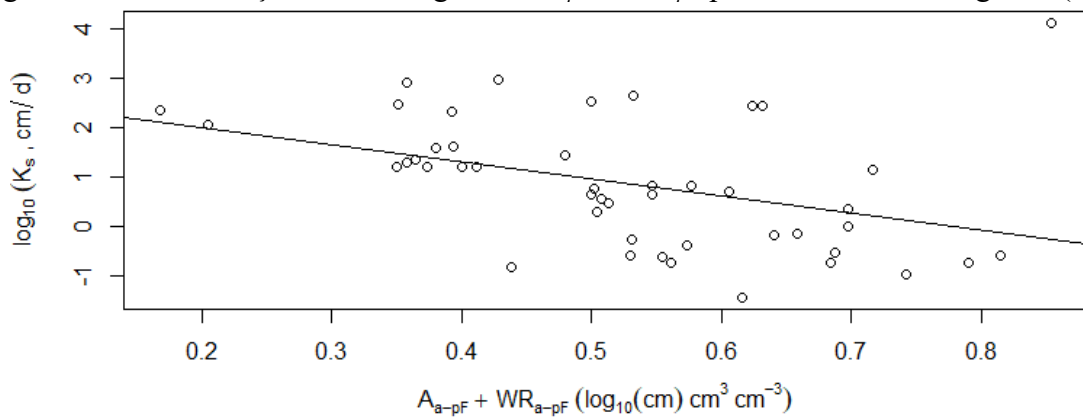
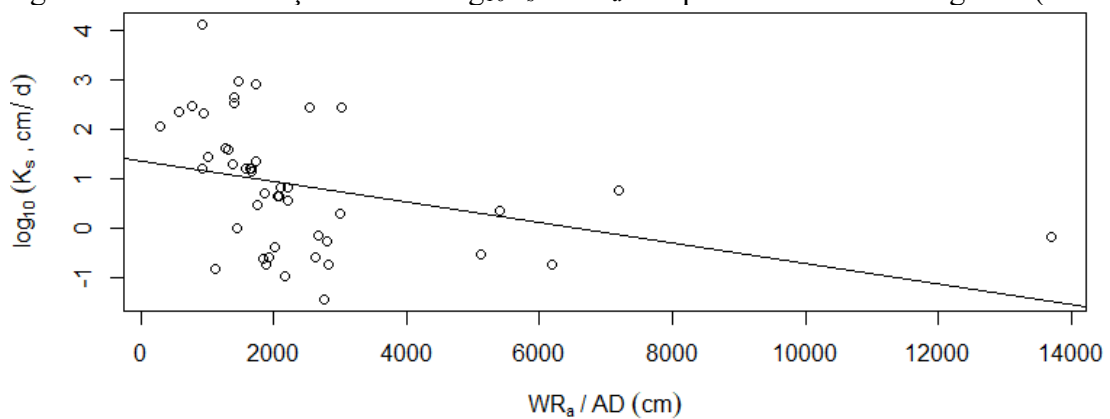
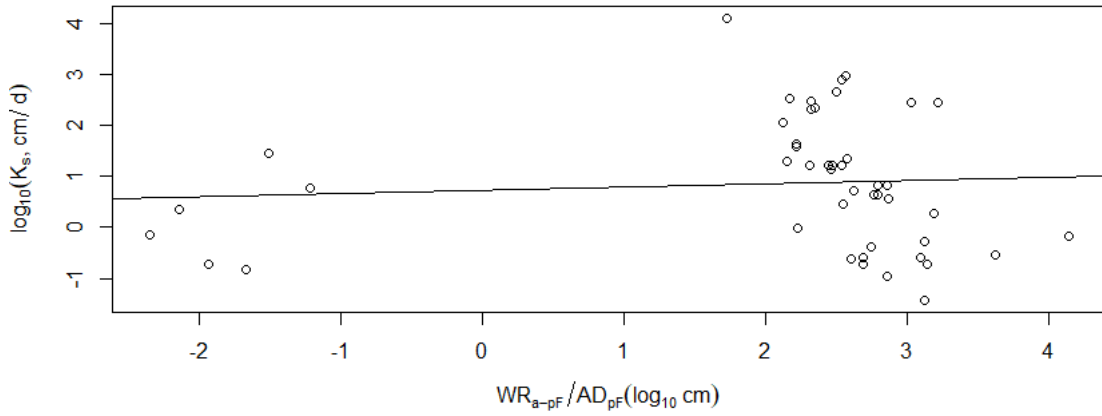


Figura 81 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_a/AD para textura muito argilosa (N = 46).



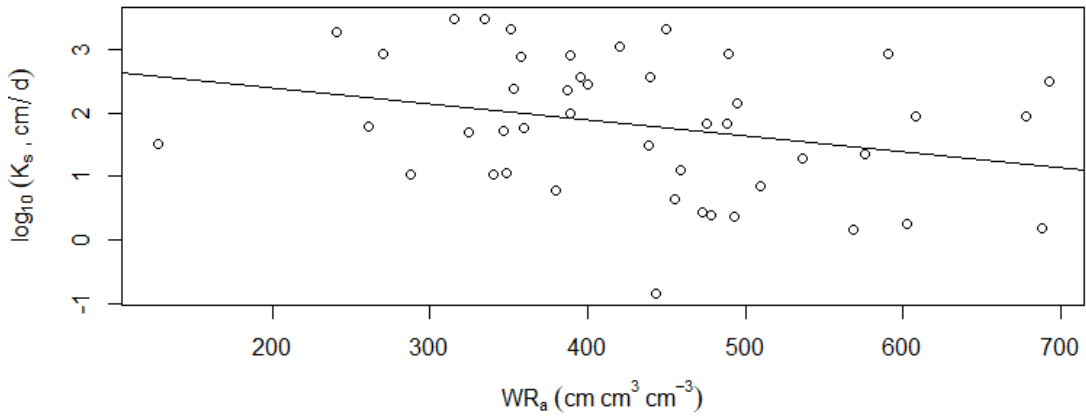
Fonte: do autor (2022).

Figura 82 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_{a-pF}/AD_{pF} para textura muito argilosa (N = 46).



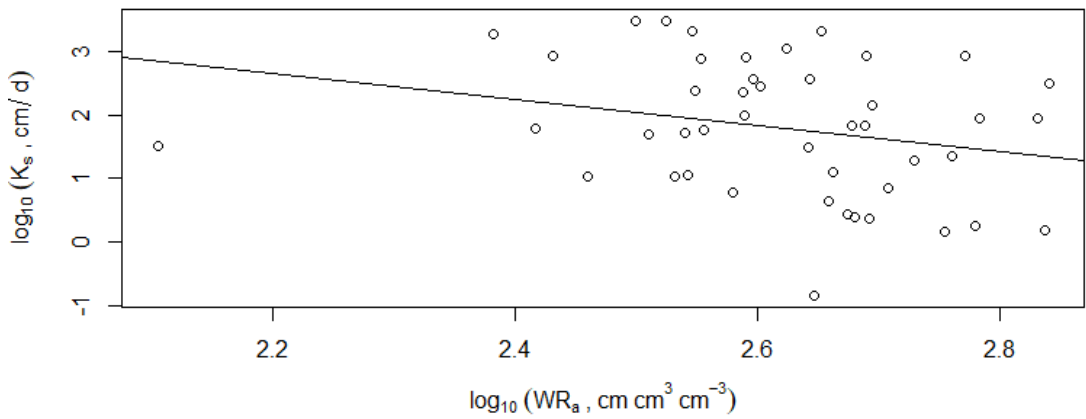
Fonte: do autor (2022).

Figura 83- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_a para textura siltosa (N = 45).



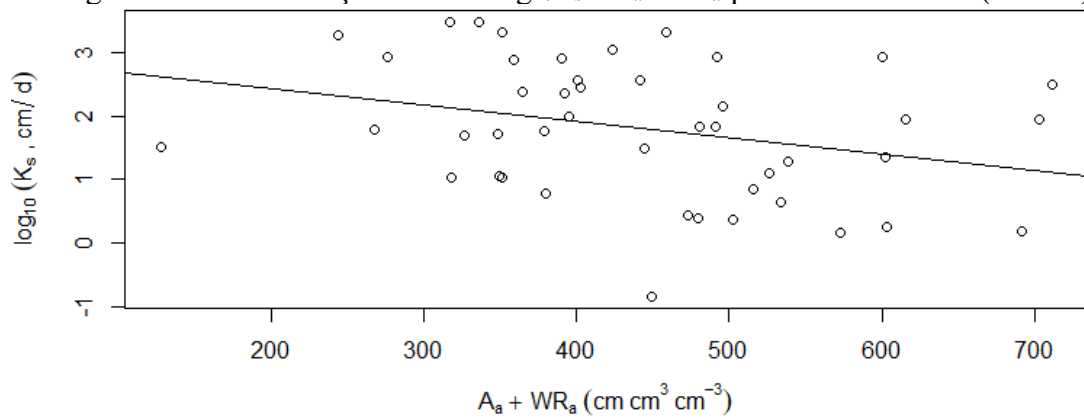
Fonte: do autor (2022).

Figura 84- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $\log_{10}WR_a$ para textura siltosa (N = 45).



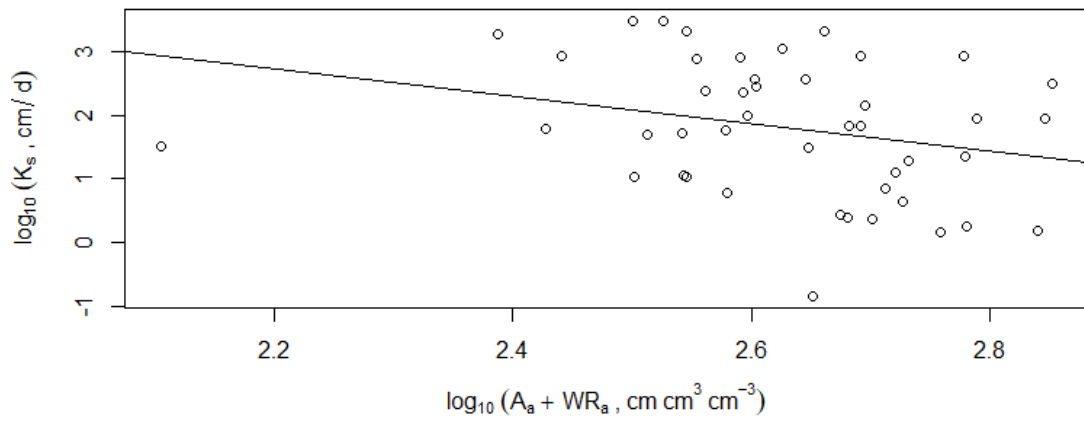
Fonte: do autor (2022).

Figura 85- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e A_a+WR_a para textura siltosa (N = 45).



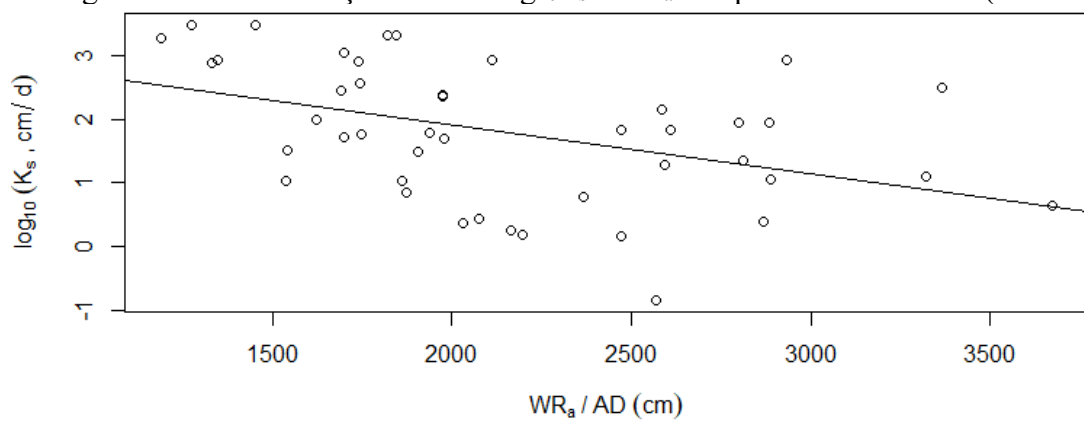
Fonte: do autor (2022).

Figura 86- Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e $\log_{10}(A_a+WR_a)$ para textura siltosa (N = 45).

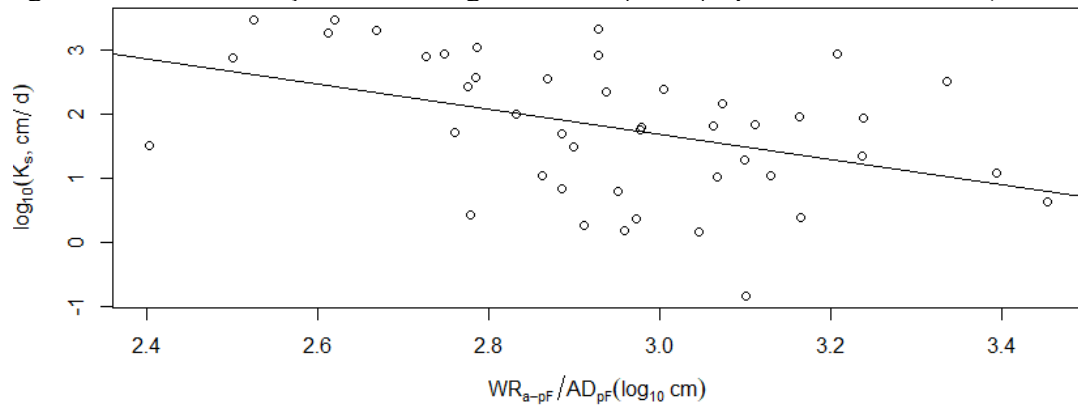


Fonte: do autor (2022).

Figura 87 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_a/AD para textura siltosa (N = 45).



Fonte: do autor (2022).

Figura 88 - Valores traçados entre $\log_{10}K_s$ e WR_{a-pF}/AD_{pF} para textura siltosa (N = 45).

Fonte: do autor (2022).