

Estimate of Saturated Hydraulic Conductivity and Surface Saturation and Residual Humidity of Soils in the State of Paraíba Modeled by Pedotransfer

Paulo R. M. Francisco^{*}, Djail Santos^{**}, Flávio P. de Oliveira^{***},
George do N. Ribeiro^{****}, Viviane F. Silva^{*****}, Raimundo C. M. Rodrigues^{*****}

^{*}Dr. Prof. Visitante, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, paulomegna@gmail.com

^{**}Dr. Prof. Titular, Universidade Federal da Paraíba, UFPB, santosdjail@gmail.com

^{***}Dr. Prof. Ajunto, Universidade Federal da Paraíba, UFPB, flavio.oliveira@academico.ufpb.br

^{****}Dr. Prof. Associado, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, george.nascimento@professor.ufcg.edu.br

^{*****}Dra. Profa. Associada, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, viviane.farias@professor.ufcg.edu.br

^{*****}Dr. Prof. Associado, Universidade Estadual do Maranhão, UEMA, calixto@cca.uema.br

Received 05 June; accepted 10 February.

ABSTRACT

In works involving knowledge of soil water dynamics, knowledge of the hydraulic conductivity of saturated soil and saturation and residual moisture is fundamental. This work proposed to estimate and map saturated hydraulic conductivity and saturation and residual moisture content in the surface layer of soils in the State of Paraíba using pedotransfer and modeling through geoprocessing techniques. The chemical and physical attributes data described in the representative profiles of the Agricultural Zoning of the State of Paraíba of the superficial layer were used and using FTPs the hydraulic conductivity of the saturated soil was estimated, the estimate of the saturation humidity the estimate of the residual saturation humidity and QGIS[®] was used for mapping. In the statistical treatment, the descriptive analysis of the data and the normality test were performed using the RStudio[®] software. The use of the pedotransfer technique provided satisfactory results combined with the use of geotechnologies. The Anderson-Darling, Lilliefors and Shapiro-Wilk normality tests were similar to each other. The kurtosis coefficients of the data indicated a leptokurtic distribution. The saturated hydraulic conductivity was predominantly in the medium to low class promoted by the characteristics of the sandy texture of the soils. The highest values of saturated hydraulic conductivity with the presence of organic matter were mostly found in the Litoral and Agreste region, where the semi-arid climate does not occur. The occurrence of saturation moisture showed agreement with soil texture characteristics defining representative mapping ranges. Residual saturation moisture of the Upper class was influenced by higher clay content in soil composition.

Keywords: physical attributes, organic matter, density, pedometry, modeling.

Estimativa da Condutividade Hidráulica Saturada e as Umidades de Saturação e Residual Superficial dos Solos do Estado da Paraíba Modelada por Pedotransfêrencia

RESUMO

Em trabalhos que envolvem o conhecimento da dinâmica de água no solo é fundamental o conhecimento da condutividade hidráulica do solo saturado e das umidades de saturação e residual. Este trabalho propôs estimar e mapear condutividade hidráulica saturada e as umidades de saturação e residual da camada superficial dos solos do Estado da Paraíba utilizando funções de pedotransfêrencia e modelagem através de técnicas de geoprocessamento. Utilizou-se dos dados dos atributos químicos e físicos descritos nos perfis representativos do Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba da camada superficial e utilizando FTPs foram estimadas a condutividade hidráulica do solo saturado, a estimativa a umidade de saturação a estimativa da umidade de saturação residual utilizado o QGIS[®] para o mapeamento. No tratamento estatístico foi realizada a análise descritiva dos dados e o teste de normalidade utilizando o software RStudio[®]. O uso da técnica de pedotransfêrencia proporcionou resultados satisfatórios aliado ao uso das geotecnologias. Os testes de normalidade de Anderson-Darling, Lilliefors e Shapiro-Wilk apresentaram-se semelhantes entre si. Os coeficientes de curtose dos dados indicaram uma distribuição leptocúrtica. A condutividade hidráulica saturada apresentou-se predominantemente na classe média à baixa promovida pelas características da textura arenosa dos solos. Os maiores valores de condutividade hidráulica saturada com presença de matéria orgânica apresentaram-se em sua maioria na região do Litoral e Agreste onde não ocorre o clima semiárido. A ocorrência da umidade de saturação apresentou concordância com as características de textura dos solos definindo faixas de mapeamento representativas. A umidade de saturação residual da classe Alta foi influenciada pelos maiores teores de argila na composição dos solos.

Palavras-chave: atributos físicos, matéria orgânica, densidade, pedometria, modelagem.

1 Introdução

A água é um componente essencial ao ambiente, especialmente para os seres vivos. O volume de água disponível no solo para as plantas determina a produtividade das culturas agrícolas em muitas regiões do mundo. Sua magnitude varia desde 4% em solos excessivamente arenosos até 28% em solos siltosos. Esta variação depende da textura, mineralogia, matéria orgânica, propriedades químicas e estrutura do solo, os quais necessitam ser mais bem avaliados para entender a retenção e disponibilidade de água no solo (Costa, 2012). Nos solos com menor disponibilidade, o estresse hídrico é mais frequente e quando ocorre, os processos moleculares e fisiológicos (Ramos et al., 1999), o desenvolvimento e a produtividade das culturas são prejudicados.

Muitos fatores afetam a retenção da água em um solo, sendo o principal deles a textura, pois determina a área de contato entre as partículas sólidas e a água, assim como as proporções de poros de diferentes tamanhos. A estrutura pelo arranjo das partículas também afeta a retenção de água, a textura refere-se apenas a tamanho de partícula e, principalmente das argilas devido às suas características cristalográficas, têm ótimas propriedades de retenção de água. A matéria orgânica, quando coloidal, também apresenta boas propriedades de retenção de água (Reichardt, 1990).

Outro parâmetro importante na dinâmica de água, pode-se destacar a condutividade hidráulica do solo que traduz a facilidade com que a água se movimenta ao longo do perfil de solo (Reichardt & Timm, 2004; Carvalho, 2002). Associado a umidade do solo constitui-se em uma das variáveis mais importantes para estudos de infiltração, drenagem, condutividade hidráulica e irrigação; sendo a umidade saturada do solo uma propriedade hídrica determinante para a escolha dos cultivos mais adequados, um solo saturado não é o mais propício para o crescimento de plantas, pois pode afetar a oferta de oxigênio no solo, essencial para a respiração das raízes (Lacerda, 2007; Rossato et al., 2004; Demuelenaere, 2004). Em trabalhos que envolvem o conhecimento da dinâmica de água no solo é fundamental o conhecimento da condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) e das umidades de saturação (Θ_s) e residual (Θ_r) (Rodrigues & Maia, 2011). O valor máximo de K é obtido quando o solo se encontra em situação de saturação, neste caso se denomina condutividade hidráulica saturada K_s (Reichardt & Timm, 2004).

Normalmente, para fazer inferências do valor verdadeiro das propriedades hidrodinâmicas do solo é necessário coletar um grande número de informações, e isso implica em ensaios de campo e de laboratório dispendiosos e que demandam um tempo longo de execução. O custo efetivo dessas determinações levou alguns pesquisadores a utilizarem métodos indiretos que se baseiam em dados do solo prontamente disponíveis, usuais e de baixo custo, como a textura, a densidade dos solos, a porosidade, o teor de matéria orgânica, dentre outros (Minasny et al., 1999; Minasny & Mcbratney, 2002). Essas relações são comumente denominadas de Funções de Pedotransferência - FPT (pedotransfer functions). De acordo com Wösten et al. (2001), a distribuição do tamanho das partículas, a densidade do solo, o teor de matéria orgânica, a umidade, o teor de certos componentes da fração argila são alguns dos atributos do solo mais utilizados para gerar FPTs.

Na tentativa de estimar as propriedades hidráulicas de solos foram desenvolvidas pedofunções por Vereecken (1989) para os solos belgas, Wösten e van Genuchten (1988), Van den Berg et al. (1997), Nemes et al. (2001), Ghorbani e Homaei (2004) para solos europeus, Rajkai et al. (2004) para solos húngaros, Gupta e Larson (1979), Rawls e Brakensiek (1982), Campbell (1985) e por Puckett et al. (1985) para os solos estadunidenses, Goncalves et al. (1997), Tomasella et al. (2000), Rossato (2001), Medrado e Lima (2014) e Silva (2018), para solos brasileiros, do Cerrado por Rodrigues e Maia (2011), Rodrigues et al. (2013) para a região riograndense, Silva et al. (1990), Oliveira et al. (2002) e Moreira et al. (2004); Barros et al. (2013) para solos da região semiárida brasileira, e para alguns solos representativos do Estado da Paraíba por Pequeno (2016).

A aplicação de modelagem matemática e de geoprocessamento na análise de sistemas ambientais são recursos desenvolvidos a muitas décadas, enquadrando-se como procedimentos teóricos no uso de uma abordagem holística, por meio de avaliações quantitativas e qualitativas. A compreensão sobre a interação entre modelagem e o uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG), parte da premissa de que os estudos das séries temporais e das análises espaciais devem acontecer conjuntamente (Christofolletti, 1999). Conforme Filippini Alba (2014), a modelagem via SIG possibilita a fusão dessas camadas de informações, ampliando a capacidade de interpretação dos dados e auxiliando na tomada de decisão para a gestão do sistema de produção.

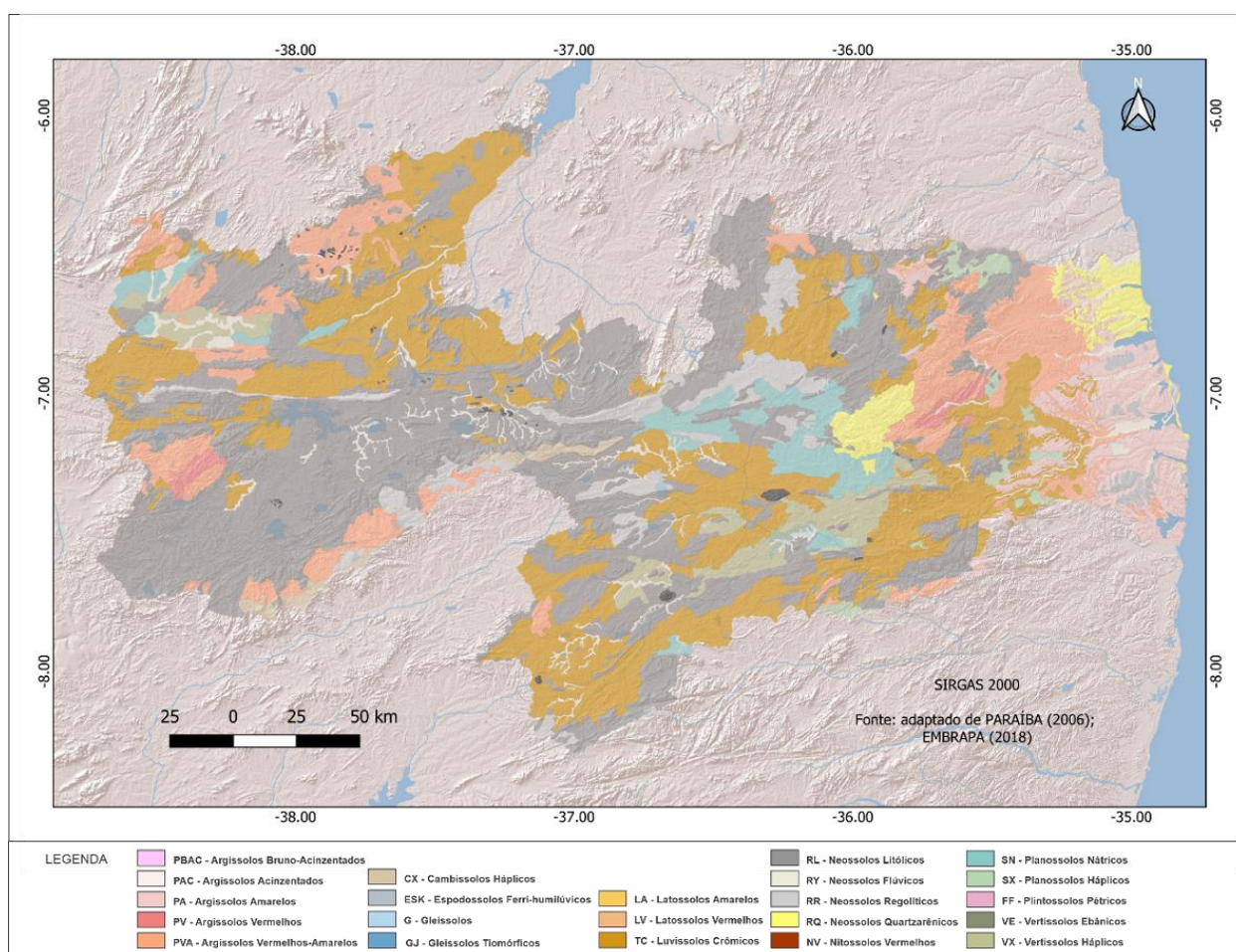
Neste sentido, propõe-se por este trabalho, estimar e mapear a condutividade hidráulica

saturada e as umidades de saturação e residual da camada superficial dos solos do Estado da Paraíba utilizando pedotransferência e modelagem através de técnicas de geoprocessamento.

2 Material e métodos

O Estado da Paraíba, localizado na região Nordeste do Brasil, apresenta uma área de 56.467,24 km² (IBGE, 2021). Seu posicionamento encontra-se entre os paralelos 6°02'12" e 8°19'18"S, e entre os meridianos de 34°45'54" e 38°45'45"W. Ao Norte, limita-se com o Estado do Rio Grande do Norte; ao Leste, com o Oceano Atlântico; a Oeste, com o Estado do Ceará; e ao Sul, com o Estado de Pernambuco (Francisco, 2010).

As classes predominantes de solos área de estudo estão descritas no Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba (PARAÍBA, 1978), e estas diferem pela diversidade geológica, pedológica e geomorfológica; atendendo também a uma diversidade de características de solo, relacionadas à morfologia, cor, textura, estrutura, declividade e pedregosidade e outras características (Francisco et al., 2013). De uma forma geral os solos predominantes são os Luvisolos crômicos, Neossolos Litólicos, Planossolos Solódicos, Neossolos Regolíticos Distróficos e Eutróficos distribuídos pela região do sertão e nos cariris, os Vertissolos na região de Souza, e os Argissolos Vermelho Amarelo e os Neossolos Quartzarênicos no litoral do Estado (Francisco, 2010) (Figura 1).



Inicialmente foi criada uma planilha no Excel® onde utilizou-se dos dados dos atributos físicos descritos nos 64 perfis representativos de PARAÍBA (1978) (Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba) e de maneira complementar à alguns perfis do Litoral foi utilizado o Levantamento pedológico detalhado e estoque de

carbono orgânico do solo da Floresta Nacional Restinga de Cabedelo (EMBRAPA, 2017). Foi considerada a camada de solo superficial representando em termos médios, a camada de solo agricultável.

Utilizando a técnica da pedometria, os dados dos perfis obtidos foram transferidos seus

valores para solos similares descritos no Boletim do Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba (BRASIL, 1972) para se enquadrarem ao mapa de solos.

Para estimar a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s), foi utilizada a FPT desenvolvida por Rodrigues e Maia (2011) (Equação 1), em que, se considera as propriedades físicas dos solos, e também foi utilizada a FPT desenvolvida por Wösten et al. (1999) (Equação 2), que se considera a matéria orgânica dos solos ($\ln K_s$). Para a estimativa da umidade de saturação (Θ_s) foi utilizada a FPT proposta por Barros et al. (2013) (Equação 3), e para da estimativa da umidade de saturação residual (Θ_r) foi utilizada a FPT proposta por Oliveira et al. (2002) (Equação 4).

$$K_s = 2874,57 - 1772,17D_s - 11,75ARG - 18,73AG \text{ (Eq.1)}$$

$$\ln(K_s) = 7,75 + 0,0352SIL + 0,93 PC - 0,967 D_s^2 - 0,000484 ARG^2 - 0,000322 SIL^2 + 0,001 SIL^{-1} - 0,0748 MO^{-1} - 0,643 \ln(SIL) - 0,01398 D_s ARG - 0,1673 D_s MO + 0,02986 PCARG - 0,03305 PCSIL \text{ (Eq.2)}$$

$$\Theta_s = 0,5526 - 0,2320 AR - 0,1178 ARG \text{ (Eq.3)}$$

$$\Theta_r = -0,000021AR + 0,000203 SIL + 0,000054 ARG + 0,021656 D_s \text{ (Eq.4)}$$

Em que: K_s em $m^3 m^{-3}$; $\ln(K_s)$ em $m^3 m^{-3}$; Θ_s em $m^3 m^{-3}$; Θ_r em $m^3 m^{-3}$; AG: areia grossa (%); AF: areia fina (%); AR: areia total (%); SIL: silte (%); ARG: argila (%); MO: matéria orgânica (%); D_s : densidade do solo ($kg dm^{-3}$); PC: profundidade de coleta onde apresenta valor 1 = coleta superficial ou valor 0 = subsuperficial.

Utilizando-se o software QGIS® 3.42.3 foi importado arquivo digital em formato shape dos solos da área de estudo na escala de 1:200.000 fornecido pela AESA (PARAÍBA, 2006), representando a área de estudo e a ocorrência e distribuição das classes de solos predominantes no Estado e seus limites atualizados (IBGE, 2021). Em seguida, utilizando a tabela de atributos os polígonos dos solos foram classificados com os valores obtidos e transformados no formato *raster* e após classificados conforme a Tabela 1. Para os cálculos de áreas foi utilizada a calculadora *raster* e o *plugin r.report* do GRASS®8.41.

Tabela 1. Parâmetros de classificação das variáveis físicas dos solos

Variável	Classe				
	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
$K_s (m^3 m^{-3})$	< 0,400	0,400 - 0,800	0,800 – 1,200	1,200 - 1,600	> 1,600
$\ln(K_s) (m^3 m^{-3})$	< 0,400	0,400 - 0,800	0,800–1,200	1,200 - 1,600	> 1,600
$\Theta_s (m^3 m^{-3})$	<0,300	0,300 – 0,340	0,340–0,380	0,380 - 0,420	> 0,420
$\Theta_r (m^3 m^{-3})$	< 0,300	0,300 – 0,340	0,340 – 0,380	0,380 - 0,420	> 0,420

No tratamento estatístico foi realizada a análise descritiva dos dados e o teste de normalidade utilizando o software RStudio® v.2025. Para avaliação foi utilizado a regressão clássica, conforme o modelo de regressão (Equação 5).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon_i \text{ (Eq.5)}$$

Onde: Y_i é uma observação da variável dependente; $X_1, X_2, \dots, X_n$ são as variáveis independentes; $\beta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ são referidos como coeficientes de regressão correspondentes, e ε_i é o erro associado às observações da variável dependente.

Para verificar se as amostras procediam de uma determinada distribuição de probabilidade,

foram usados os testes de hipóteses não paramétricos de Anderson-Darling (1954), Shapiro-Wilk (1965) e Lilliefors (1967).

3 Resultados e discussão

Na Tabela 2, da análise estatística descritiva das variáveis/atributos, observa-se que o maior desvio padrão ocorre na variável Areia Grossa seguida da Areia Total e menor desvio nas variáveis Θ_s e Θ_r como também a menor média. A Areia Total apresenta a maior média e mediana de alcance. O maior valor de Curtose apresenta-se na variável Θ_s seguida da Densidade. Os coeficientes de curtose dos dados apresentam valores na sua maioria positivos, indicando uma distribuição leptocúrtica. Resultado similar ao obtido por Hurtado (2004).

Tabela 2. Análise descritiva das variáveis/atributos

Atributo/Variável	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	Desv. Pad.	1ºQ	3ºQ	Curtose
Areia Grossa (%)	0	33,85	31,00	83,00	15,15	24,00	39,00	0,89
Areia Fina (%)	0	33,24	32,00	69,00	8,52	28,75	36,00	3,14
Areia Total (%)	0	66,98	63,00	97,00	14,24	56,00	79,00	0,53
Silte (%)	0	18,11	21,00	35,00	8,82	12,00	26,00	-1,14
Argila (%)	0	14,07	11,00	47,00	8,18	9,00	19,00	0,97
Matéria Orgânica (%)	0	1,27	1,24	3,63	0,62	0,78	1,71	0,10
Densidade (kg dm ⁻³)	0	1,67	1,71	2,03	0,17	1,58	1,76	29,87
K _s (m ³ m ⁻³)	0	0,889	0,917	1,515	0,224	0,732	0,930	1,29
ln(K _s) (m ³ m ⁻³)	0	1,010	0,993	1,728	0,345	0,883	1,250	1,09
Θ _s (m ³ m ⁻³)	0	0,367	0,394	0,431	0,036	0,363	0,396	54,72
Θ _r (m ³ m ⁻³)	0	0,385	0,400	0,497	0,057	0,366	0,430	8,07

Para a camada de solo superficial, Rodrigues e Maia (2011) observaram que o teor de MO apresentou média de 2,94%; argila de 54,0%; silte de 21,2%; areia fina de 9,4%; areia grossa de 5,5%; densidade de 1,303%. Resultado este, devido a área de estudo dos autores estar localizada sob Latossolos Vermelhos na região central do Brasil, e este trabalho estar sob solos menos desenvolvidos em região semiárida.

Observa-se que a Areia Total apresenta o maior valor, conforme Barros et al. (2013) a fração granulométrica da areia é maior, por ser característica da região Nordeste, onde predominam solos rasos e intemperizados.

Nos *boxplots* dos *quantis* teórico e acumulado (Figura 2), observa-se uma distribuição normal nas variáveis estudadas seguida de comportamento de distribuição normal.

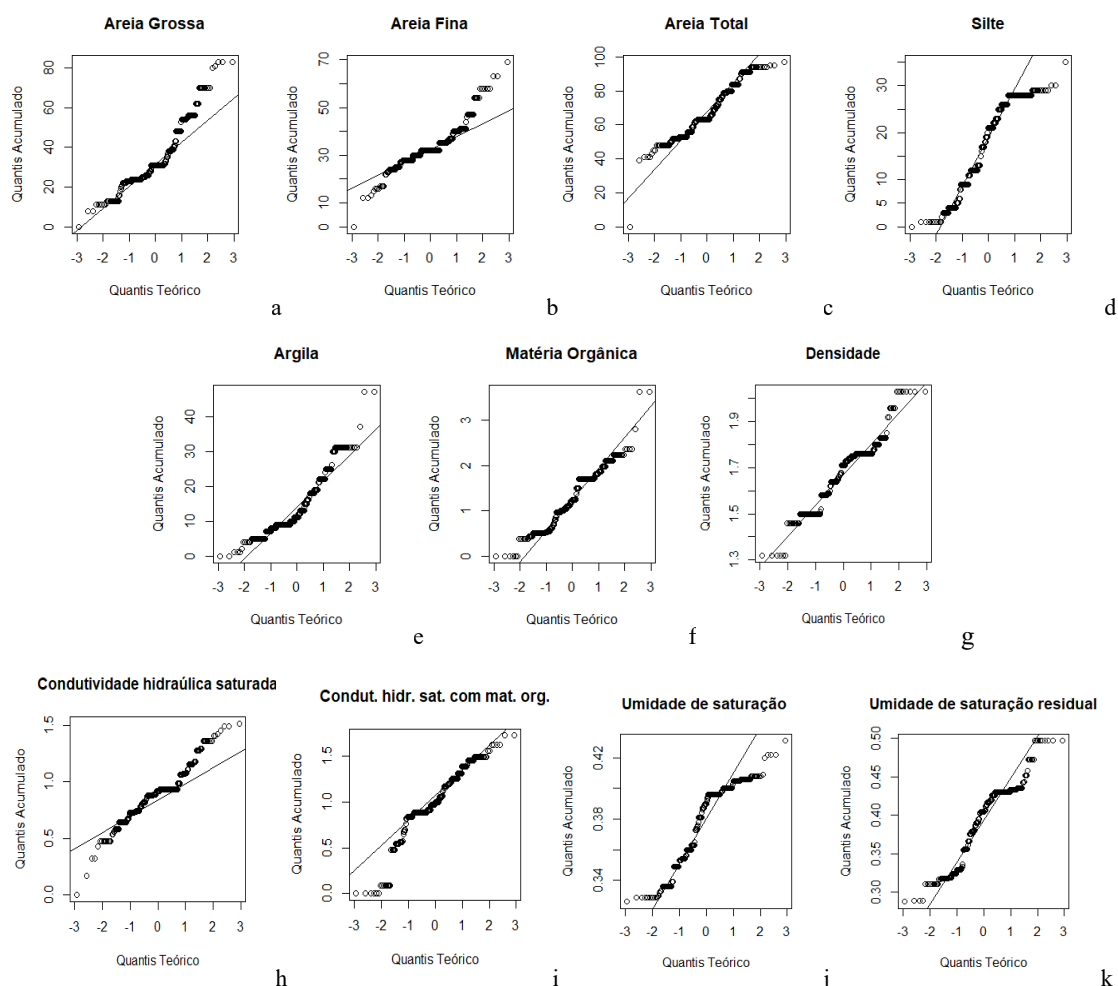


Figura 2. Quantis das variáveis: (a) areia grossa (%); (b) areia fina (%); (c) areia total (%); (d) silte (%); (e) argila (%); (f) matéria orgânica (%); (g) densidade (kg dm⁻³); (h) K_s (m³ m⁻³); (i) ln(K_s) (m³ m⁻³); (j) Θ_s (m³ m⁻³); (k) Θ_r (m³ m⁻³).

Na Tabela 3 pode-se observar os resultados dos testes de normalidade de Anderson-Darling, Lilliefors e Shapiro-Wilk, em que se apresentam-

se semelhantes entre si, o que leva a aceitar a hipótese de normalidade nos dados.

Tabela 3. Testes de normalidade

Atributo/Variável	Anderson-Darling		Lilliefors		Shapiro-Wilk	
	A	p-valor	D	p-valor	W	p-valor
Areia Grossa (%)	10,732	2,200e ⁻¹⁶	0,195	2,200e ⁻¹⁶	0,908	1,446e ⁻¹²
Areia Fina (%)	10,589	2,200e ⁻¹⁶	0,191	2,200e ⁻¹⁶	0,900	3,981e ⁻¹³
Areia Total (%)	4,293	1,096e ⁻¹⁰	0,143	2,200e ⁻¹⁶	0,951	2,280e ⁻⁸
Silte (%)	8,486	2,200e ⁻¹⁶	0,138	3,42e ⁻¹⁵	0,916	6,920e ⁻¹²
Argila (%)	10,088	2,200e ⁻¹⁶	0,173	2,200e ⁻¹⁶	0,903	6,449e ⁻¹³
Matéria Orgânica (%)	4,466	4,193e ⁻¹¹	0,154	2,200e ⁻¹⁶	0,955	7,269e ⁻⁸
Densidade (kg dm ⁻³)	6,108	4,808e ⁻¹⁵	0,128	5,51e ⁻¹³	0,948	9,697e ⁻⁹
Ks (m ³ m ⁻³)	6,072	5,847e ⁻¹⁵	0,191	2,200e ⁻¹⁶	0,954	4,871e ⁻⁸
ln(Ks) (m ³ m ⁻³)	5,285	4,490e ⁻¹³	0,154	2,200e ⁻¹⁶	0,934	3,108e ⁻¹⁰
Θs (m ³ m ⁻³)	12,895	2,200e ⁻¹⁶	0,214	2,200e ⁻¹⁶	0,897	2,327e ⁻¹³
Θr ((m ³ m ⁻³)	9,341	2,200e ⁻¹⁶	0,136	1,24e ⁻¹⁴	0,927	7,519e ⁻¹¹

Na Figura 3 observa-se a distribuição espacial da Condutividade hidráulica do solo saturado em que se distribui em 65,50% (36.984,26 km²) das terras na classe Média (0,800 – 1,200 m³ m⁻³) distribuída por todo o Estado na diversidade de solos; a classe Alta (1,200 - 1,600 m³ m⁻³) contempla somente 5,65% da área sob os

Luvissolos no interior do Estado e sob os Neossolos Quartzarênicos no Litoral; quanto as classes Baixa e Muito Baixa (<0,400 - 0,800 m³ m⁻³) apresentam-se em 28,85% dos solos distribuída por toda a área sob os Neossolos Flúvicos. A classe Muito Alta (>1,600 m³ m⁻³) não apresenta área espacializada por este trabalho.

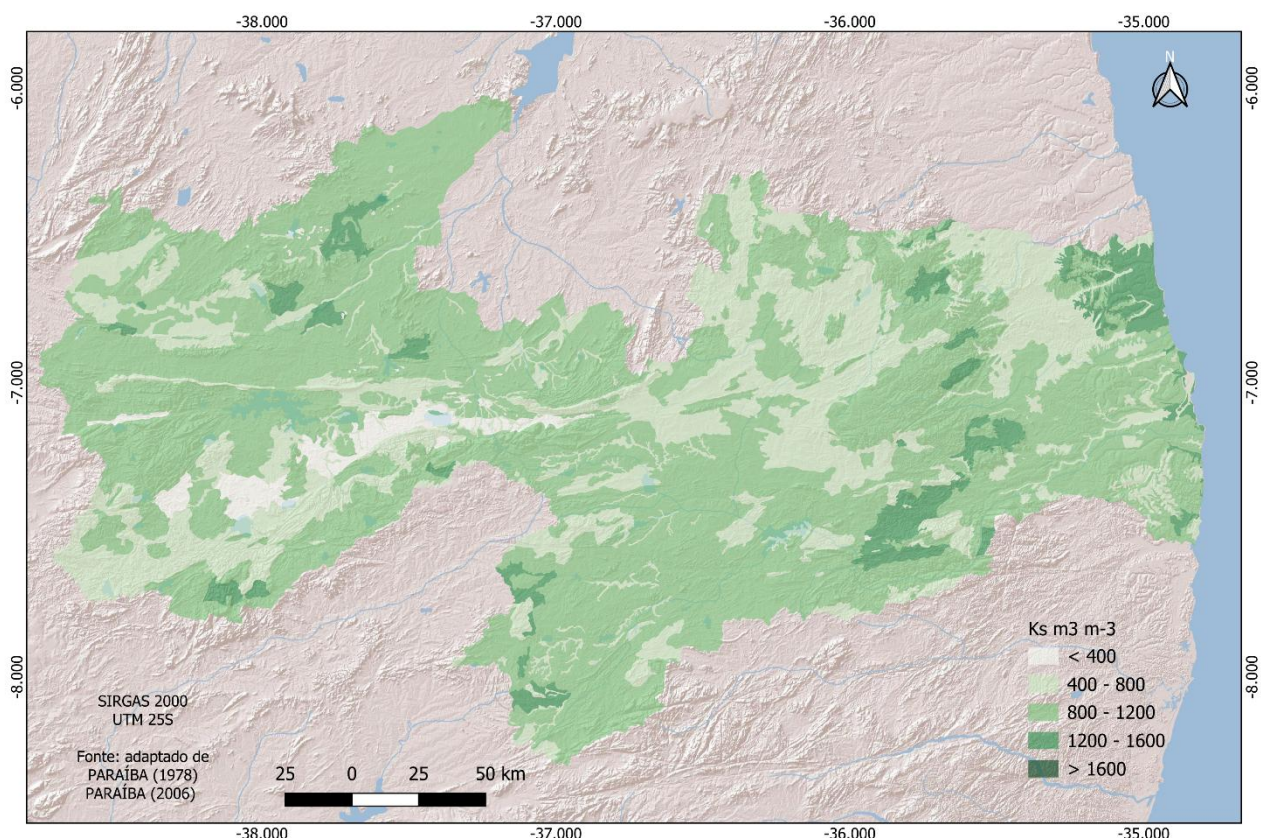


Figura 3. Ks - Condutividade hidráulica do solo saturado do Estado da Paraíba. Fonte: adaptado de PARAÍBA (1978; 2006); IBGE (2021); ESRI (2023).

Na Tabela 4 apresenta-se a distribuição espacial das classes referentes aos parâmetros em estudo.

Tabela 4. Distribuição espacial dos atributos

Classe/ Atributo	Muito Baixa		Baixa		Média		Alta		Muito Alta	
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%
Ks (m ³ m ⁻³)	1.226,02	2,17	15.066,56	26,68	36.984,26	65,50	3.190,40	5,65	0	0
ln(Ks) (m ³ m ⁻³)	2.134,16	3,78	5.816,05	10,30	40.226,89	71,24	7.648,92	13,55	641,22	1,14
Os (m ³ m ⁻³)	72,40	0,13	3.678,32	6,51	13.817,76	24,47	38.535,95	68,24	362,82	0,64
Or (m ³ m ⁻³)	309,77	0,55	6.614,35	11,71	6.651,31	11,78	15.775,86	27,94	27.115,95	48,02

Os Neossolos Quartzarênicos apresentam-se constituídos por solos profundos, excessivamente drenados, arenosos. Apresenta horizonte A fracamente desenvolvido e o teor de argila não ultrapassa a 15%. Os Neossolos Flúvicos são pouco desenvolvidos, provenientes de deposições fluviais, ao qual seguem camadas estratificadas (argilo-arenosa, areno-argilosa, argilo-siltosa, ou arenosas), sem relação genética entre si, normalmente. Possuem argila de atividade alta e alta saturação de bases, são pouco profundos ou profundos, apresentando drenagem moderada ou imperfeita. Ocorrem em quase todas as regiões, como componentes secundários ou como inclusões em áreas de outras unidades, em estreitas faixas ao longo dos cursos d'água e ocupam normalmente as cotas mais baixas (BRASIL, 1972; PARAÍBA, 1978).

Bosch e West (1998), estudaram a variabilidade da condutividade hidráulica saturada de dois solos arenosos e observaram que, a taxa de infiltração foi diferente, apesar das texturas similares na camada superficial dos solos estudados. Para Rodrigues e Maia (2011), o Ks variou de 4,2 a 2.619 m³ m⁻³, valores maiores em relação a este trabalho, que para os Latossolos apresenta valor máximo de 1.153,54 m³ m⁻³. Observa-se por este trabalho que a variabilidade da condutividade hidráulica ocorre devido as diferenças naturais existentes no solo.

Pequeno (2016), avaliando funções de pedotransferência para estimativa de retenção de água em solos da mesorregião do agreste paraibano, obteve para a condutividade hidráulica saturada do Neossolo Quartzarênico os melhores valores médios seguido do Neossolo Litólico e Planossolo Háplico, isto devido as menores densidade do solo. De acordo com Bernardes (2005) e Prevedello (2012), valores elevados de densidade do solo exercem influência na redução da condutividade hidráulica do solo saturado, uma vez que reduz a quantidade de poros grandes. Por outro lado, teores elevados da fração areia

contribuem na maior proporção de macroporos, promovendo incremento na transmissão da água em solo saturado.

Farias (2008), avaliando atributos físico-hídricos dos solos da Região Norte Fluminense observou que, a alta variabilidade dos atributos físicos, com coeficientes de variação elevados, deve-se também em grande parte a uma considerável variação de solos na região, o que contribui para uma maior variação nas características hídricas para a área em estudo.

De acordo com Cadima et al. (1980), o estudo da variabilidade espacial das propriedades hidráulicas de um solo é essencial para a obtenção de valores médios representativos de áreas maiores que possam ser utilizados com segurança nos estudos de dinâmica da água no solo.

Na Figura 4 observa-se a distribuição espacial da Condutividade hidráulica do solo saturado com presença de matéria orgânica que apresenta 71,24% (40.226,89 km²) das terras na classe Média (0,800 – 1,200 m³ m⁻³) distribuída por todo o interior do Estado na diversidade de solos; a classe Alta (1,200 - 1,600 m³ m⁻³) e Muito Alta (>1,600 m³ m⁻³) se apresentam em 14,69% (8.290,14 km²) da área localizada em sua maioria no Litoral e áreas adentrando o interior; quanto as classes Baixa e Muito Baixa (<0,400 - 0,800 m³ m⁻³) apresentam-se em 14,08% (7.950,21 km²) sob os Luvisolos no interior e sob Neossolos Quartzarênicos no Litoral.

Os Neossolos Litólicos, que se apresentam na classe média (800 - 1200 m³ m⁻³) é devido aos mesmos apresentarem um horizonte A moderadamente desenvolvido com normalmente maiores teores de matéria orgânica, maior espessura, maior desenvolvimento de estrutura quando relacionado com outros Neossolos distribuídos por todo o Estado (BRASIL, 1972; PARAÍBA, 1978).

Quando se leva em consideração na estimativa do Ks a presença da matéria orgânica no solo, proporciona resultados diversos da

condutividade hidráulica saturada, como para os Neossolos Quartzarênicos onde se enquadra na classe Muito Baixa. Nos demais solos localizados na região litorânea, estes apresentam valores mais altos sob os Argissolos Vermelhos, Argissolos Vermelho Amarelo e sob os Gleissolos

Tiomórficos. Junqueira et al. (2018) salientam que, outros fatores podem influenciar na elevação da taxa de infiltração em camadas superficiais como o aumento no teor de matéria orgânica e mudanças de declividade do terreno.

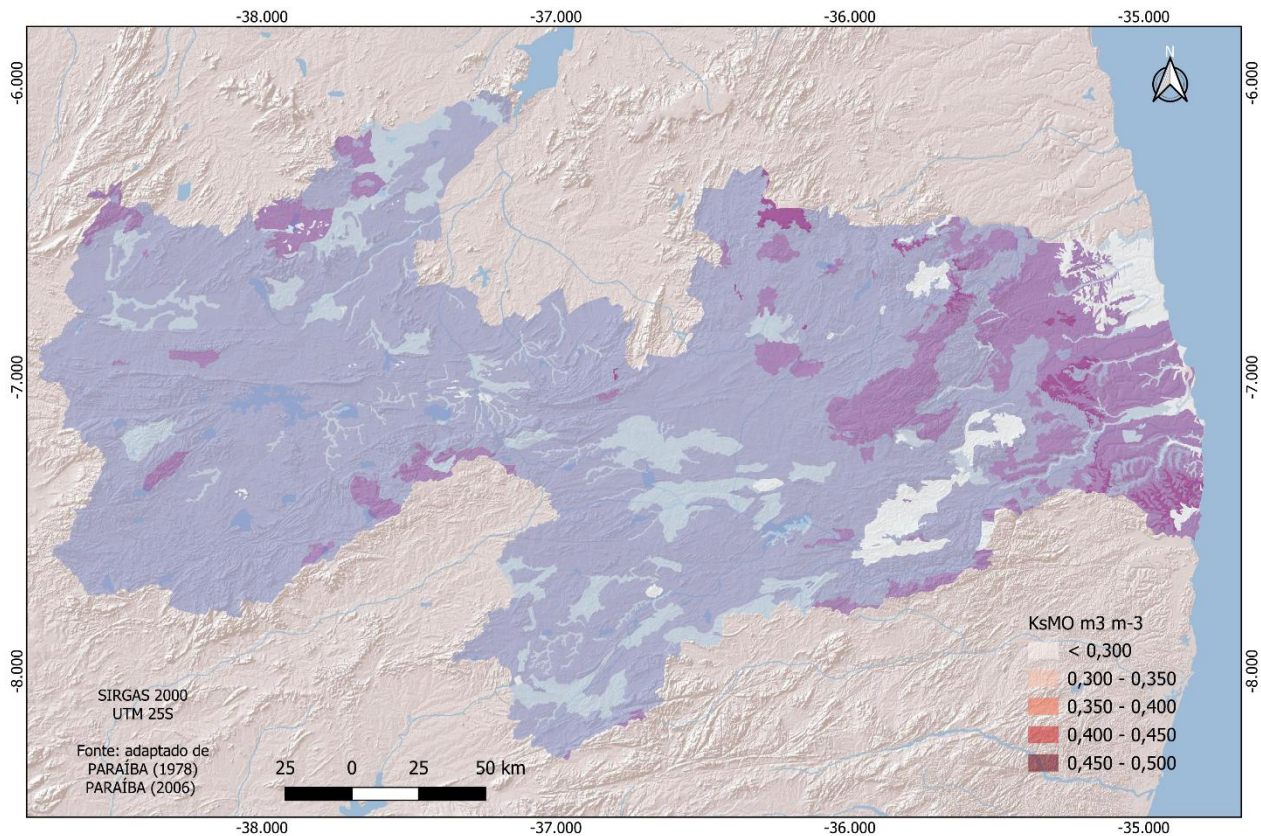


Figura 4. $\ln(K_s)$ - Condutividade hidráulica do solo saturado com presença de matéria orgânica do Estado da Paraíba. Fonte: adaptado de PARAÍBA (1978; 2006); IBGE (2021); ESRI (2023).

Os Gleissolos Tiomórficos compreendem solos com baixa saturação de bases e textura variando desde arenosa até argilosa, formados em terrenos baixos, com horizonte superficial espesso, muito escuro ou mesmo preto, resultante da acumulação de matéria orgânica. Os Argissolos apresentam horizonte argílico, argila de atividade baixa, a dominância da fração areia. A relação silte/argila é baixa evidenciando pouca reserva de minerais facilmente intemperizáveis. Quimicamente, são de acidez média, pobres em nutrientes e matéria orgânica (BRASIL, 1972; PARAÍBA, 1978).

Costa et al. (2013), utilizando funções de pedotransferência para estimar a retenção e disponibilidade de água em solos de Santa Catarina, observaram que os solos com textura mais fina e, ou, com maior teor matéria orgânica retêm maior conteúdo de água, sendo a matéria orgânica o principal atributo que controla a

disponibilidade de água para as plantas nos horizontes superficiais do solo. Campinas et al. (2013) afirmam que, devido ao fato de a matéria orgânica atuar na estruturação de agregados do solo, o que possibilita maior arranjo dos poros, isto implica na maior retenção de água pelos solos.

Outro fator importante de influência na velocidade de percolação dos fluidos no solo é a presença de matéria orgânica, a qual pode diminuir a permeabilidade do solo quando encontrada em quantidades menores e totalmente decomposta, ou pode aumentar a permeabilidade quando encontrada em grande quantidade no solo e pouco decomposta (Reichardt, 1990).

Diversos autores afirmam que, quaisquer atividades que modifiquem a estrutura do solo como, por exemplo, compactação por máquinas agrícolas ou pisoteio de animais, práticas culturais e manejos adotados, poderão causar modificações

nos valores da condutividade (Ellies et al., 1997; Mesquita & Moraes, 2003; Llanillo et al., 2006; Moreti et al., 2006; Ferreira, 2008; Reichardt & Timm, 2012; Horel et al., 2015; Alagna et al., 2017; Elhakeem et al., 2018; Haruna et al., 2018; Silva, 2019).

Conforme a Figura 5 pode-se observar a distribuição espacial da Umidade de saturação do solo distribuída em 68,88% (38.898,77 km²) das terras na classe Alta (0,380 - 0,420 m³ m⁻³) e Muito

Alta (>0,420 m³ m⁻³) por toda a região interiorana sob clima semiárido na diversidade de solos, e no Litoral sob os Neossolos Flúvicos e Gleissolos; a classe Média (0,340 – 0,380 m³ m⁻³) distribuída em 13.817,76 km² (24,47%) por todo o Estado na diversidade de solos; quanto as classes Baixa e Muito Baixa (<0,300 - 0,340 m³ m⁻³) perfazem 6,64% (3.750,72 km²) sob os Neossolos Quartzarênicos localizados na região do Brejo.

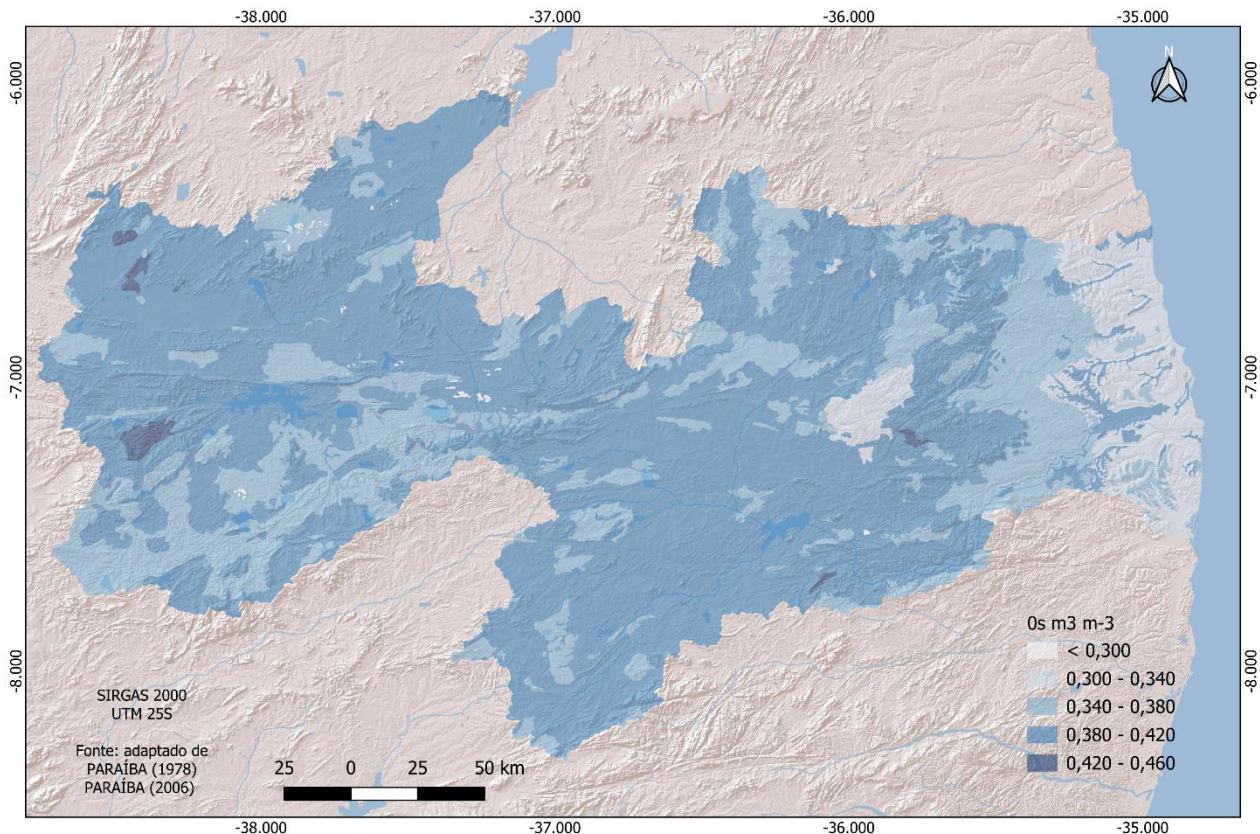


Figura 5. Os - Umidade de saturação dos solos do Estado da Paraíba. Fonte: adaptado de PARAÍBA (1978; 2006); IBGE (2021); ESRI (2023).

Os Gleissolos desenvolvem-se a partir de sedimentos argilosos, argilo-arenosos ou arenosos, com horizonte A derivado de sedimentos minerais em mistura com matéria orgânica apresentam textura variando desde arenosa até argilosa, com grande influência do lençol d'água durante um longo período, com acumulação de matéria orgânica proveniente da decomposição dos vegetais. Os Neossolos Flúvicos originam-se de sedimentos arenosos e areno-siltosos, recentes, não consolidados, referidos ao Holoceno. Situam-se em relevo predominantemente plano com desníveis máximos em torno de 2%. Apresentam boas propriedades físicas e químicas, tendo como principais limitações o excesso de umidade

(inundação), durante certas épocas do ano e baixos teores de fósforo. Os Neossolos Quartzarênicos da região do Brejo compreendem solos pouco desenvolvidos, muito arenosos, profundos, com soma de bases, capacidade de permuta de cátions e saturação de bases muito baixas, fortemente drenados e são desenvolvidos a partir de granitos e migmatitos em áreas de relevo plano e suave ondulado, tendo como cobertura a floresta caducifólia e a caatinga hipoxerófila. Possui textura arenosa, estrutura muito fraca pequena granular simples e consistência quando seco solto. Com relação as propriedades físicas verifica-se que a fração areia predomina sobre as demais frações (areia fina, silte e argila). Observa-se também que

a relação silte/argila é bastante baixa. Quanto às propriedades químicas, são solos fortemente ácidos e de fertilidade natural baixa (BRASIL, 1972; PARAÍBA, 1978).

Silva et al. (2021), avaliando a qualidade físico-hídrica dos Vertissolos, observaram que a umidade de saturação para a camada superficial se apresenta entre 0,598 e 0,603 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, valores maiores do que deste trabalho que se apresenta na classe Alta (0,380 – 0,420 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), talvez devido à presença marcante de argilominerais do tipo 2:1 no Vertissolo que tende a elevar a capacidade de retenção de água, principalmente pela presença de cargas relacionadas a adsorção (Reichert et al., 2009).

Quanto aos Planossolos Háplicos, que por este trabalho se apresentam na classe Alta (0,380 – 0,420 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Nóbrega et al. (2022), estimando por pedotransferência a retenção e a disponibilidade de água, destes localizados no Agreste, observaram valores para a umidade de saturação entre 0,444 e 0,453 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, resultado mais alto do que por este trabalho, isto devido utilizarem a equação matemática proposta por Van Genuchten (1980). De acordo com Sousa et al.

(2013), os Planossolos apresentam adensamento no horizonte subsuperficial, devido às suas características pedogenéticas, apresentando horizonte B plânico. Devido a este fator pode ter afetado o resultado obtido por Nóbrega et al. (2022).

Amaral et al. (2016), avaliando a condutividade hidráulica saturada em Minas Gerais obtiveram valores similares a este trabalho para os Argissolos Vermelho Amarelo, Argissolo e Luvisolos Crômicos.

Através da Figura 6 observa-se a distribuição espacial da Umidade de saturação residual do solo distribuída em 48,02% (27.115,95 km^2) das terras na classe Muito Alta ($>0,420 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$) por toda a região interior da área de estudo sob a diversidade de solos; a classe Alta (0,380 - 0,420 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) apresenta-se em 15.775,86 km^2 distribuída em 27,94% das terras; a classe Média (0,340 – 0,380 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) distribuída em 6.651,31 km^2 (11,78%) por todo o Estado; quanto às classes Baixa e Muito Baixa ($<0,300$ a $0,340 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$) perfazem 12,26% (6.924,12 km^2) localizados sob sua maioria na região do Litoral.

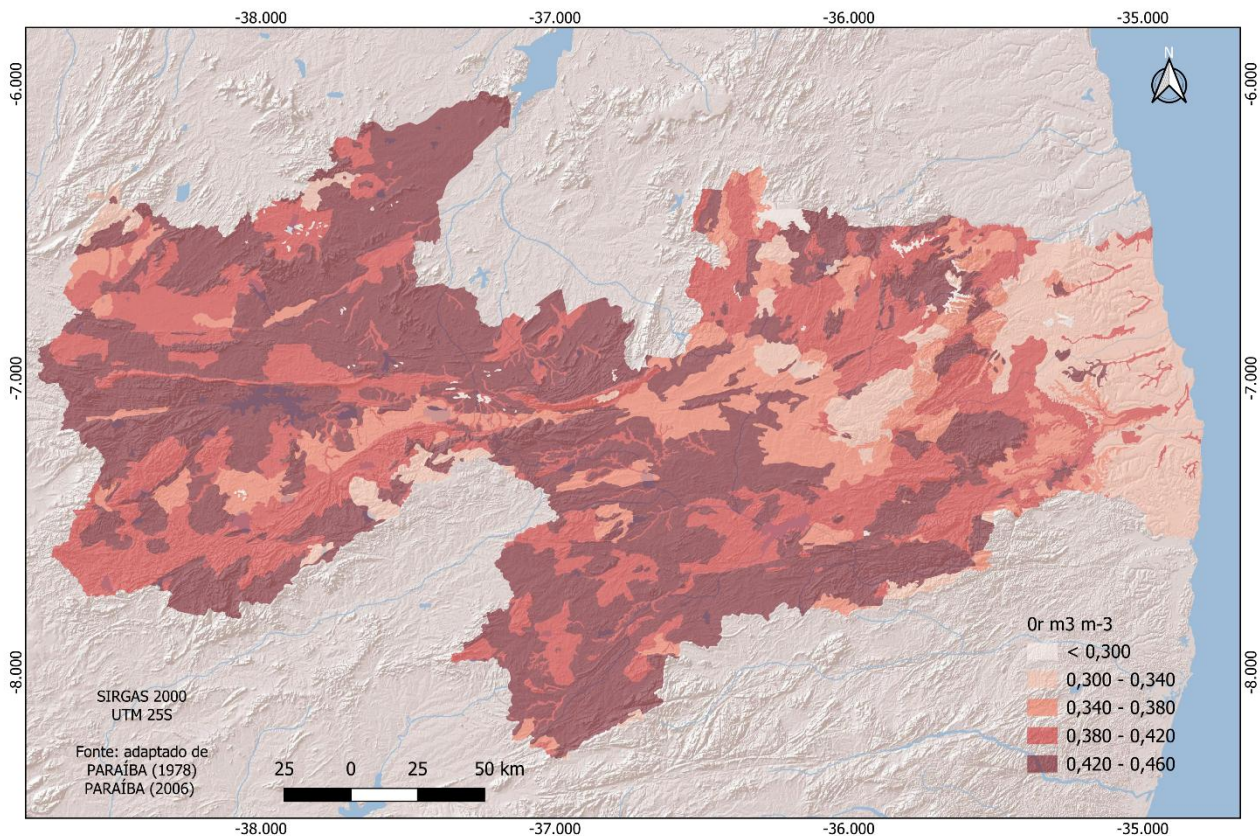


Figura 6. Or - Umidade de saturação residual dos solos do Estado da Paraíba. Fonte: adaptado de PARAÍBA (1978; 2006); IBGE (2021); ESRI (2023).

Rodrigues e Maia (2011), observaram para a umidade residual da camada superficial a variação entre 0,13 e 0,35 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) para os solos do Cerrado. No entanto os valores obtidos por este trabalho apresentam-se nas classes de níveis Alto e Muito Alto, isto devido estarem localizados em sua maioria sob os Luvisolos que conforme BRASIL (1972) e PARAÍBA (1978) apresentam horizonte B textural, não hidromórficos, com argila de atividade alta. Possuem soma de bases permutáveis, capacidade de troca de cátions e saturação de bases altas e reações moderadamente ácidas a praticamente neutras. Onde com estes atributos podem reter a água no solo devido as suas características físicas.

Os Vertissolos apresentam-se na classe Alta (0,380 – 0,420 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Silva et al. (2021), avaliando a qualidade físico-hídrica destes, observaram valores da umidade de saturação residual para a camada superficial entre 0,331 e 0,458 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, valores similares a este trabalho.

Silva et al. (2019), observaram para o Planossolo Háptico o conteúdo de água retido foi da ordem de 0,374 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para a camada de 0,00-0,10 m, valores similares a este trabalho.

4 Conclusão

O uso da técnica de pedotransferência proporcionou resultados satisfatórios aliado ao uso das geotecnologias.

Os testes de normalidade de Anderson-Darling, Lilliefors e Shapiro-Wilk apresentaram-se semelhantes entre si. Os coeficientes de curtose dos dados indicaram uma distribuição leptocúrtica.

A condutividade hidráulica saturada apresentou-se predominantemente na classe média à baixa promovida pelas características da textura arenosa dos solos.

Os maiores valores de condutividade hidráulica saturada com presença de matéria orgânica apresentaram-se em sua maioria na região do Litoral e Agreste onde não ocorre o clima semiárido.

A ocorrência da umidade de saturação apresentou concordância com as características de textura dos solos definindo faixas de mapeamento representativas.

A umidade de saturação residual da classe Alta foi influenciada pelos maiores teores de argila na composição dos solos.

Referências

Alagna, V.; Prima, S. di; Comino, J.R.; Iovino, M.; Pirastru, M.; Keesstra, S.D.; Novara, A.; Cerdà, A. 2017. The impact of the age of vines on soil

hydraulic conductivity in vineyards in Eastern Spain. *Water* 10 1-11.

Amaral, J.R. do; Costa, A.M. da; Viana, J.H.M.; Oliveira, A.R. de. 2016. Condutividade hidráulica saturada em solos na bacia do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas-MG. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 20, 2016, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu.

Anderson, T.W.; Darling, D.A. 1954. A test of goodness of t. *Journal of American Statistical Association* 49 765-769.

Barros, A.H.C.; Lier Q.J.V.; Maia, A.H.N.; Scarpere, F.V. 2013. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37 379-391.

Bernardes, R.S. 2005. Condutividade hidráulica de três solos da região norte fluminense. 80f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes.

Bosch, D.D.; West, L.T. 1998. Hydraulic conductivity variability for two sandy soils. *Soil Science Society of America Journal* 62 90-98.

BRASIL. 1972. Ministério da Agricultura. Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba. Rio de Janeiro. (Boletins DPFS-EPE-MA, 15 - Pedologia 8). Convênio MA/CONTA/USAID/BRASIL.

Cadima, A.; Libardi, P.L.; Reichardt, K. 1980. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica em um latossolo vermelho-amarelo textura média, no campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 4 63-66.

Campbell, G.S. 1985. *Soil physics with basic: transport models for soil plant systems*. Amsterdam: Elsevier. 150p.

Campinas, D.S.N.; Farias, P.R.S.; Lima, H.V. 2013. Atributos físicos e matéria orgânica em sistemas de uso do solo. *Revista Educação da Amazônia* 10(1) 109-125.

Carvalho, L.A. 2002. Condutividade hidráulica do solo no campo: as simplificações do método do perfil instantâneo. 86f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba.

Christofolletti, A. 1999. *Modelagem de Sistemas Ambientais*. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo. 236p.

Costa, A. da; Albuquerque, J.A.; Almeida, J.A. de; Costa, A. da; Luciano, R.V. 2013. Pedotransfer functions to estimate retention and availability of water in soils of the state of Santa Catarina,

- Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37 889-910.
- Costa, A. 2012. Retenção e disponibilidade de água em solos de Santa Catarina: Avaliação e geração de funções de pedotransferência. 423f. Tese (Doutorado em Manejo do Solo). Universidade do Estado de Santa Catarina. Lages.
- Demuelenaere, R.G.A. 2002. Caracterização de propriedades de transporte de metais pesados em solos residuais do Rio de Janeiro. 120f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- Elhakeem, M.; Papanicolaou, A.T.; Wilson, C.G.; Chang, Y.J.; Burras, L.; Abban, B.; Wills, S. 2018. Understanding saturated hydraulic conductivity under seasonal changes in climate and land use. *Geoderma* 315 75-87.
- Ellies, A.; Grez, R.; Ramires, C.G. 1997. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnostico de la estructura del suelo. *Agro Sur* 25 51-56.
- EMBRAPA. 2017. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Levantamento pedológico detalhado (Escala 1:5.000) e estoque de carbono orgânico do solo da Floresta Nacional Restinga de Cabedelo, municípios Cabedelo e João Pessoa, PB. (Org). Coelho, M.R. et al. Rio de Janeiro. 122p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento/Embrapa Solos).
- EMBRAPA. 2018. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Santos et al. 5a. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa. 359p.
- ESRI. Mapa Topográfico Mundial. Disponível em: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=30e5fe3149c34df1ba922e6f5bbf808f>. Acesso em: junho de 2023.
- Farias, L. N. 2008. Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos dos solos da Região Norte Fluminense. 65f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Curso de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- Ferreira, S.T. 2008. Avaliação da relação entre a condutividade hidráulica do solo saturado com parâmetros físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico submetido a dois diferentes manejos. 101f. Dissertação (Mestrado em Física). Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa.
- Filippini Alba, J.M. 2014. Modelagem SIG em agricultura de precisão: conceitos, revisão e aplicações. In: Bernardi, A.C.C.; Naime, J.M.; Resende, A.V.; Bassoi, L.H.; Inamasu, R.Y. (Ed.). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa. p.84-95.
- Francisco, P.R.M. 2010. Classificação e mapeamento das terras para mecanização do Estado da Paraíba utilizando sistemas de informações geográficas. 122f. Dissertação (Manejo de Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba. Areia.
- Francisco, P.R.M.; Chaves, I. de B.; Lima, E.R.V. de. 2013. Classificação de terras para mecanização agrícola e sua aplicação para o Estado da Paraíba. *Revista Educação Agrícola Superior* 28(1) 30-35.
- Ghorbani, S.D.; Homae, M. 1999. Using geometric mean particle diameter to derive point and continuous pedotransfer functions. In: Whrle, N.; Scheurer, M. (Eds.). *EuroSoil*, 10:30, 2004. International Conference, Freiburg.
- Gonçalves, M.C.; Pereira, L.S.; Leij, F.J. 1997. Pedo-transfer functions for estimating unsaturated hydraulic properties of portuguese soils. *Soil Science* 48(3) 387-400.
- Gupta, S.C.; Larson, W.E. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter content and bulk density. *Water Resource Research* 15(6) 1633-1635.
- Haruna, S.I.; Anderson, S.H.; Nkongolo, N.V.; Zaibon, S. 2018. Soil hydraulic properties: Influence of tillage and cover crops. *Pedosphere* 28 430-442.
- Horel, Á.; Tóth, E.; Gelybó, G.; Kása, I.; Bakacsi, Z.; Farkas, C. 2015. Effects of land use and management on soil hydraulic properties. *De Gruyter – Open Geosciences* 7 742-754.
- Hurtado, A.L.B. 2004. Variabilidade da condutividade hidráulica do solo em valores fixos de umidade e de potencial matricial. 94f. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba.
- IBGE. 2021. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Malhas territoriais. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 10 de abril de 2022.
- Junqueira, R.; Mello, C.R.; Oliveira, A.S.; Alves, G.J.; Aires, U.R.V. 2018. Análise da condutividade hidráulica saturada em uma floresta de cedro em Madrid, Espanha. *Revista Agrogeoambiental* 10(3) 75-89.
- Lacerda, C.F. 2007. Relações solo-água-planta em ambientes naturais e agrícolas do nordeste

- brasileiro. Recife: Universidade Rural de Pernambuco. 78p.
- Lilliefors, H.W. 1967. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association* 62(318) 399-402.
- Llanillo, R.F.; Richart, A.; Tavares Filho, J.; De Fátima Guimarães, M.; Ferreira, R.R. 2006. Evolução de propriedades físicas do solo em função dos sistemas de manejo em culturas anuais. *Semina: Ciências Agrárias* 27 205- 220.
- Medrado, E.; Lima, J.E.F.M. 2014. Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of Brazilian savanna. *Geoderma Regional* 1 55-66.
- Mesquita, M. da G. B. de F.; Moraes, S. O. 2004. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciência Rural* 34 963-969.
- Minasny, B.; Mcbratney, A.B.; Bristow, K.L. 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water retention curves. *Geoderma* 93 225-253.
- Minasny, B.; Mcbratney, A.B. 2002. The efficiency of various approaches to obtaining estimates of soil hydraulic properties. *Geoderma* 107 55-70.
- Moreira, L.F.F.; Righetto, A.M.; Medeiros, V.M.A. 2004. Soil hydraulics properties estimation by using pedotransfer functions in a Northeastern semiarid zone catchment, Brazil. In: *International Environmental Modelling and Software Society*, 2, 2004, Osnabrueck. Anais...Osnabrueck.
- Moreti, D.; Alves, M.C.; Perozini, A.C.; Paz González, A.; Silva, E.C. 2006. Condutividade hidráulica e resistência à penetração do solo influenciada por diferentes sistemas de manejo. *Cadernos do Laboratório Geológico de Lage* 3 29-42.
- Nemes, A.; Wösten, J.H.M.; Lilly, A. 1999. Development of Soil Hydraulic Pedotransfer Functions on a European scale: their usefulness in the assessment of soil quality. In: Stott, D.E.; Mohtar, R.H.; Steinhardt, G.C. (eds). *Sustaining the Global Farm. International Soil Conservation Organization Meeting*, 10, p.541-549.
- Nóbrega, C. C. da; Silva, P. L. F. da; Oliveira, F. P. de; Campos, M. C. C.; Sousa Neto, A. T. de. 2022. Funções de pedotransferência para estimar a retenção e a disponibilidade de água em Planossolo Háptico sob sistemas integrados de produção agropecuária no Agreste da Paraíba. *Scientia Plena* 18 e070202.
- Oliveira, L.B.; Ribeiro, M.R.; Jacomine, P.K.T.; Rodrigues, J.J.V.; Marques, F.A. 2002. Funções de pedotransferência para predição de umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 26 315-323.
- PARAÍBA. 1978. Governo do Estado. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. CEPA-PB. Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba. Relatório ZAP-B-D-2146/1. UFPB-EletoConsult Ltda. 448p.
- PARAÍBA. 2006. Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente. Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba, AESA. PERH-PB: Plano Estadual de Recursos Hídricos: Resumo Executivo & Atlas. Brasília. 112p.
- Pequeno, P. L. de L. 2016. Funções de pedotransferência para estimativa de retenção de água em solos da mesorregião do agreste paraibano. 188f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal da Paraíba. Areia.
- Prevedello, J. 2012. Dinâmica do armazenamento e da disponibilidade de água em Argissolo sob eucalipto e campo nativo. 120f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.
- Puckett, W.E.; Dane, J.H.; Hajek, B.F. 1985. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulics properties. *Soil Science Society American Journal* 49 831-836.
- Rajkai, K.; Kabo, S.; Van Genuchten, M. Th. 2004. Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. *Soil & Tillage Research* 79 145-152.
- Ramos, M.L.G.; Gordon, A.J.; Minchin, F.R.; Sprent, J.I.; Parsons, R. 1999. Effect of water stress on nodule physiology and biochemistry of a drought tolerant cultivar of common bean. *Annals Botany* 83 57-63.
- Rawls, W.J.; Brakensiek, D.L. 1982. Estimating soil water retention from soil properties. *Journal of Irrigation Drainage Division* 108 (1R2) 166-171.
- Reichardt, K. 1990. *A Água em Sistemas Agrícolas*. São Paulo: Manole. 188p.
- Reichardt, K.; Timm, L.C. 2012. Redistribuição da água no solo. In: Reichardt, K.; Timm, L.C. (Eds.). *Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações*. Barueri, Manole. p.269-291.

- Reichardt, K.; Timm, L.C. 2004. Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações. São Paulo: Editora Manole. 478p.
- Reichert, J.M.; Albuquerque, J.A.; Kaiser, D.R.; Reinert, D.; Reinert, D.J.; Urach, F.L.; Carlesso, R. 2009. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33 1547-1560.
- Rodrigues, L.N.; Maia, A. de H.N. 2011. Funções de pedotransferência para estimar a condutividade hidráulica saturada e as umidades de saturação e residual do solo em uma bacia hidrográfica do Cerrado. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 19, 2011, Maceió. Anais...Maceió.
- Rodrigues, M.F.; Costa, A. da; Rodrigues, L.A.; Giraldi, G.T.; Reichert, J.M.; Borges Júnior, N. 2013. Funções de pedotransferência para a estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado em solos da Depressão Central do RS. In: *Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, 34, 2013, Florianópolis. Anais...Florianópolis.
- Rossato, L. 2001. Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil. 145f. Dissertação (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos.
- Rossato, L.; Alvalá, R.C.S.; Tomasella, J. 2004. Variação espaço-temporal da umidade do solo no Brasil: Análise das condições médias para o período de 1971-1990. *Revista Brasileira de Meteorologia* 19(2) 113-122.
- Shapiro, A.S.S.; Wilk, M.B. 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52(3/4) 591-611.
- Silva, B.K.E. 2018. Funções de pedotransferência para predição da condutividade hidráulica saturada de solos do Brasil. 43f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Paraná. Curitiba.
- Silva, E.F. da. 2019. Condutividade hidráulica não saturada de um Argissolo amarelo distrocoeso: método do perfil instantâneo. 66f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Cruz das Almas.
- Silva, P.L.F. da; Oliveira, F.P. de; Martins, A.F.; Pereira, W.E.; Costa, G.G. da S.; Tavares, D.D.; Campos, M.C.C.; Pequeno, P.L. de L. 2021. Efeito de diferentes sistemas de manejo na qualidade físico-hídrica de um Vertissolo (Vertisol) no Semiárido Brasileiro. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 39(2) 347-357.
- Silva, P.L.F.; Oliveira, F.P. de; Tavares, D.D.; Nóbrega, C.C.; Amaral, A.J. 2019. Water availability in a Planosol under integrated crop-livestock-forestry system in the Agreste region of Paraíba, Brazil. *Revista Caatinga* 32(2) 449-457.
- Sousa, A.R.; Albuquerque, S.F.; Lopes, G.M.B.; Silva, A.B.; Nunes Filho, J. 2013. Caracterização e interpretação de um Planossolo Háplico eutrófico do Agreste Pernambucano, Brasil. *Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica* 10 271-279.
- Tomasella, J.; Hodett, M.G.; Rossato, L. 2000. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention Brazilian soils. *Soil Science Society American Journal* 64 327-338.
- Van Den Berg, M.; Klamt, E.; Van Reeuwijk, L.P.; Sombroek, W.G. 1997. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. *Geoderma* 78 161-180.
- Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal* 44(5) 892-898.
- Vereecken, H.; Feyen, J.; Maes, J.; Darius, P. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Science* 148 389-403.
- Wösten, J.H.M.; Lilly, A.; Nemes, A.; Bas, C.L. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90 169-185.
- Wösten, J.H.M.; Pachepsky, Y.A.A.; Rawls, W.J. 2001. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology* 251 123-150.
- Wösten, J.H.M.; Van Genuchten, M. Th. 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Science Society of America Journal* 52 1762-1770.