



Estimativa da água disponível dos solos por pedotransferência para o estado da Paraíba *Estimate of available soil water by pedotransfer for the state of Paraíba*

Paulo Roberto Megna Francisco¹, Djail Santos², Flávio Pereira de Oliveira², George do Nascimento Ribeiro¹, Viviane Farias Silva¹, Raimundo Calixto Martins Rodrigues³, Gypson Dutra Junqueira Ayres¹

¹ Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil

² Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, Brasil

³ Universidade Estadual do Maranhão, Maranhão, Brasil

Contato: paulomegna@gmail.com

Palavras-chave

granulometria
função de pedotransferência
relação solo-água
modelagem

RESUMO

Funções de Pedotransferência (FPT) são modelos matemáticos que estimam propriedades do solo de difícil medição por meio de variáveis mais acessíveis, gerando otimização de tempo e de recursos financeiros. Este trabalho objetivou estimar por pedotransferência a água disponível em solos do estado da Paraíba, com base nos teores de areia, silte e argila. Para isso, informações contidas em perfis representativos do Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba e do Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba foram utilizadas, sendo estimada a água disponível por pedotransferência e mapeados os dados utilizando geotecnologias. O uso do sistema de informação geográfica e da modelagem proporcionaram a geoespacialização da estimativa de Água Disponível dos solos da área de estudo. A estimativa da AD por pedotransferência utilizando descrição das amostras oriundas de mapas de escala menor possibilitou boa caracterização dos resultados. A utilização da estimativa por pedotransferência para o cálculo da AD facilitou a determinação com rapidez e precisão, resultando em alternativa hábil e econômica. A variável Areia Total apresentou maior dispersão e maiores valores de influência nas amostras com os maiores valores médios seguida pelo Silte e Argila. A distribuição das classes de Água Disponível segue a ordem AD3 > AD4 > AD5 > AD2 > AD1 > AD6 > AD0.

Keywords

granulometry
pedotransfer function soil-water
relationship
modeling

ABSTRACT

Pedotransfer functions (PTF) are mathematical models that estimate soil properties that are difficult to measure using more accessible variables, optimizing time and financial resources. This work aimed to estimate, by pedotransfer, the water available in the soil based on the contents of the mineral particles of total sand, silt and clay based on the information contained in the representative profiles of the Exploratory Survey and Soil Recognition of the State of Paraíba and of the Agricultural Zoning of the State of Paraíba estimated by pedotransfer and mapped using geotechnologies. The use of the geographic information system and modeling provided the geospatialization of the estimate of Available Water for soils in the study area.

The estimation of AD by pedotransference using sample descriptions from smaller-scale maps enabled a good characterization of the results. The use of pedotransference estimation to calculate AD facilitated a quick and accurate determination, resulting in a skillful and economical alternative. The Total Sand variable presented greater dispersion and greater influence values in the samples with the highest average values followed by Silt and Clay. The distribution of Available Water classes follows the order AD3 > AD4 > AD5 > AD2 > AD1 > AD6 > AD0.

Informações do artigo

Recebido: 04 de maio, 2024

Aceito: 09 de novembro, 2024

Publicado: 30 de dezembro, 2024

Introdução

O conhecimento de propriedades hidrodinâmicas de um determinado solo é fundamental para o seu devido aproveitamento na agricultura, dentre outras atividades (MICHELON et al., 2010).

A granulometria é uma característica do solo que mensura as proporções relativas das frações areia, silte e argila. Esse atributo varia muito pouco no tempo e no espaço, pois são características consideradas estáveis e inerentes ao solo (KLEIN, 2012). A granulometria é uma importante propriedade do solo a ser considerada no manejo da irrigação porque influencia vários processos relacionados com o desenvolvimento do sistema radicular e com a fisiologia das plantas (WHITE, 2009).

O conceito de água disponível (AD) indica a quantidade de água que pode ser armazenada no solo e utilizada pelas plantas. Este atributo do solo é importantíssimo para a agricultura, pois, quanto maior a AD, maior será o período em que a cultura conseguirá sobreviver sem chuvas, absorvendo apenas a água armazenada no solo (TEIXEIRA et al., 2021).

A AD é definida como o teor de água no solo entre um limite superior, denominado capacidade de campo (CC), e um limite inferior, denominado ponto de murcha permanente (PMP). A capacidade dos solos de reter água em sua matriz porosa é função das suas características estruturais, físicas e mineralógicas (REICHARDT e TIMM, 2004).

As culturas agrícolas podem desenvolver sistemas radiculares mais ou menos profundos, dependendo da espécie e das condições físico-químicas do solo, e, portanto, ter acesso a um maior ou menor volume de solo e solutos. Dessa forma, a capacidade de água disponível (CAD) é calculada pela AD do solo e a profundidade efetiva do sistema radicular (Z_e) ou seja, a CAD representa o volume de água que pode ser retido pelo solo e absorvida pelas raízes. Esse conceito foi proposto por Veihmeyer e Hendrickson (1949) e, apesar de não considerar o equilíbrio dinâmico da água no sistema solo-planta-atmosfera, tem grande aplicabilidade prática (CARLESSO, 1995; LIER, 2000).

Existem vários fatores que afetam a retenção da água no solo, em um complexo processo que depende de sua estrutura, composição granulométrica, mineralógica e orgânica (RAWLS et al., 1991; WÖSTEN et al., 2001; PACHEPSKY e RAWLS, 2004), que estão ligadas à diferença de concentração e armazenamento de água no solo (MARTINS, 2019; TEIXEIRA et al., 2021).

A estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo é fundamental para os estudos de riscos de produção agrícola em modelos de simulação e planejamento do manejo da irrigação. No entanto, a avaliação direta do volume de água disponível (AD) é bastante onerosa, pois envolve a coleta de amostras indeformadas e avaliações feitas por laboratórios especializados. Essa dificuldade tem levado os pesquisadores a buscarem formas indiretas de estimar a AD e uma das alternativas mais promissoras é o uso das funções de pedotransferências (TEIXEIRA et al., 2021).

O termo função de pedotransferência (PedoTransfer Function – PTF) foi introduzido na Ciência

do Solo na segunda metade da década de 1980 para padronizar expressões anteriores (BOUMA, 1989; MCBRATNEY et al., 2002; PACHEPSKY e RAWLS, 2004; VERECKEN et al., 2010) e com o intuito de sintetizar o seu propósito de transformar dados que possuímos em dados de que necessitamos. Atualmente, este termo é empregado em um sentido mais abrangente, para designar as equações que estimam características edáficas de difícil obtenção a partir de outras mais facilmente obtidas, incluindo, até mesmo, características morfológicas, como fizeram Lin et al. (1999). As PTFs consistem-se de expressões matemáticas para se estimar atributos dos solos a partir de características medidas rotineiramente. As PTFs são métodos indiretos (MCBRATNEY et al., 2002), que apresentam facilidade, menor custo e confiabilidade para obtenção de dados (TEIXEIRA et al., 2021).

A maior parte dessas equações de FPT é baseada em regressões estatísticas, utilizando a análise de regressão múltipla. Outros métodos de predição estão sendo apresentados (BUDIMAN et al., 2003). As funções de pedotransferência tendem a ser tão mais acuradas quanto mais homogêneos forem os solos que compõem a base de dados e quão mais próximos destes estiverem os que terão seus dados estimados (OLIVEIRA et al., 2002).

Silva et al. (2008) relatam que no Brasil, Berg et al. (1997), Tomasella e Hodnett (1998) e Tomasella et al. (2000) desenvolveram funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água do solo utilizando as equações de Brooks-Corey ou van Genuchten (1980). Arruda et al. (1987) fizeram a primeira tentativa do uso de equações de regressão para estimar a água disponível com base na textura do solo. Bernoux et al. (1998) verificaram que a densidade do solo poderia ser prevista com bom nível de exatidão a partir do teor de argila do solo. Giarola et al. (2002) obtiveram regressões múltiplas para estimar os teores de água na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a água disponível em função dos teores de argila, silte e óxidos de Fe e de Al.

Diversas pesquisas têm sido realizadas como as de Silva (2015), Boschi et al. (2018) e Melo et al. (2015) no Rio Grande do Sul; Tavares Filho et al. (2012) no Estado do Paraná; Souza et al. (2017) em Minas Gerais; Pequeno et al. (2018), em Rondônia; Medeiros (2012) e Oliveira (2019) no Pará; Fuentes-Guevara et al. (2019); Costa e Soares (2021) e Barros et al. (2013) para o Brasil; e de Oliveira et al. (2002) para a região Nordeste.

Portanto, este trabalho propõe estimar a capacidade de água disponível para os solos do Estado da Paraíba utilizando modelagem por pedotransferência e mapear utilizando geotecnologias.

Material e Métodos

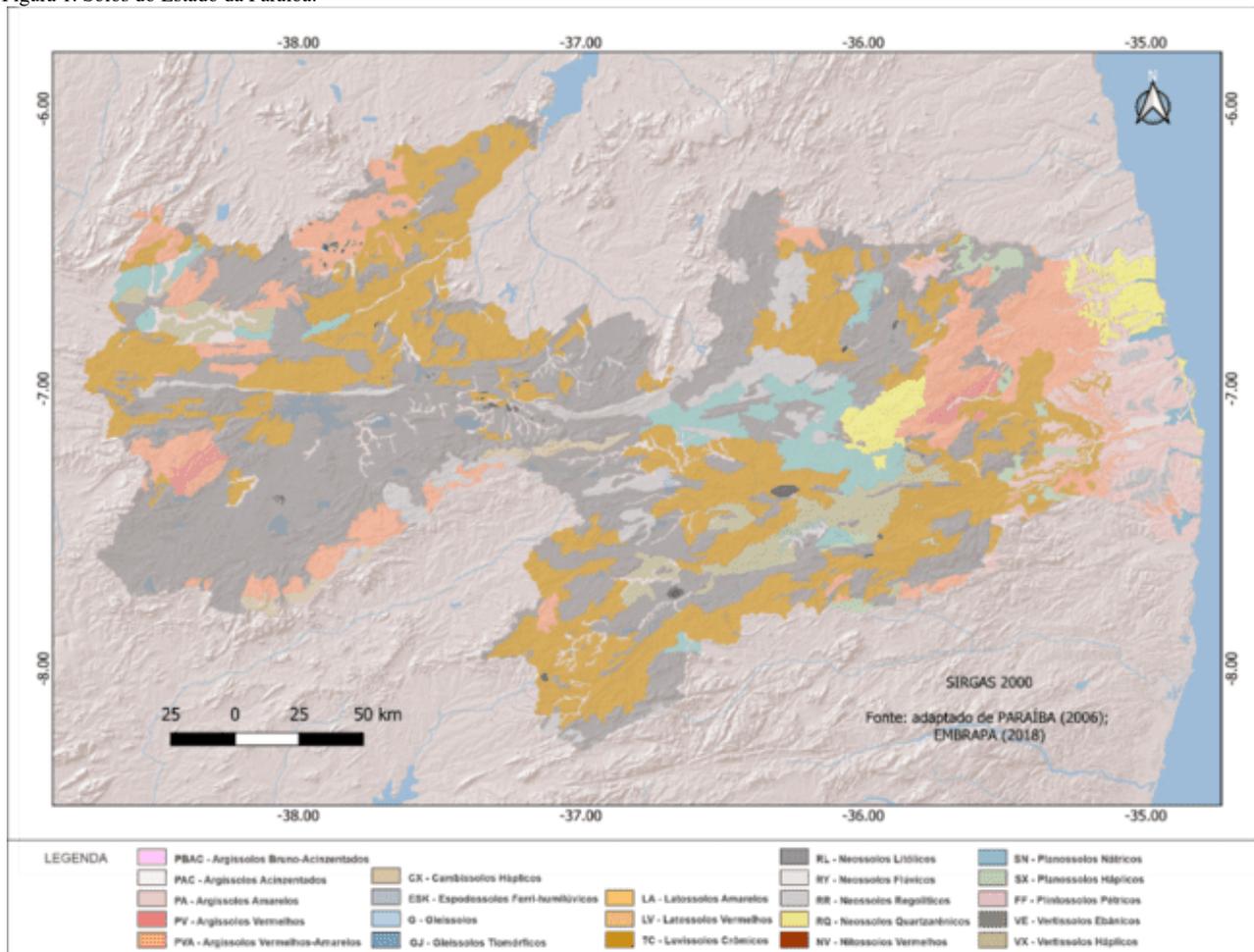
O Estado da Paraíba, localizado na região Nordeste do Brasil, apresenta uma área de 56.467,24 km² (IBGE, 2021). Seu posicionamento encontra-se entre os paralelos 6°02'12" e 8°19'18"S, e entre os meridianos de 34°45'54" e 38°45'45"W. Ao Norte, limita-se com o Estado do Rio Grande do Norte; ao Leste, com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

Conforme Francisco et al. (2015), o Estado da Paraíba apresenta, de acordo com a classificação climática de Köppen, quatro tipos diferentes de clima. O clima Aw, que caracteriza a região do Litoral norte como Tropical com estação seca no inverno, o clima Am no Litoral norte e Sul do Estado, o tipo climático As que dominam em sua maioria nas regiões de parte do Litoral, Brejo, Agreste e em pequena faixa da região do Sertão e em toda área do Alto Sertão. O tipo climático Bsh é predominante na área do Cariri/Curimataú, e boa parte da área do Sertão.

As classes predominantes de solos estão descritas no Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba (PARAÍBA, 1978), e 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 (FRANCISCO et al., 2013). De 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).

Figura 1. Solos do Estado da Paraíba.



Para a elaboração do mapa de água disponível (AD) plotou-se planilha no Excel[®] em que cada polígono de solo da área de estudo, baseado nas informações contidas em 330 polígonos obtidos nos 65 perfis representativos de BRASIL (1972) (Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba) e de PARAÍBA (1978) (Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba), para a profundidade de 30 cm, teve os dados estimados pelo método de Teixeira et al. (2021) onde a equação proposta e utilizada para os solos do Brasil apresenta-se na Equação 1.

$$AD = \{1 + [0,35941 * ((-0,02128887 * AT) + (-0,01005814 * SIL) + (0,01901894 * ARG) + (0,0001171219 * (AT * SIL)) + (0,0002073924 * (AT * ARG)) + (0,00006118707 * (SIL * ARG)) + (-0,000006373789 * (AT * SIL * ARG))]^{2,78474}\} * 10 \quad (\text{Eq.1})$$

Onde: AD: Água Disponível; AT: Areia Total; SIL: Silte; ARG: Argila.

Utilizando-se o software QGIS[®] 3.28 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.

Após, utilizando a tabela de atributos do Sistema de Informação Geográfica, os polígonos dos solos foram classificados com a estimativa obtida do cálculo de AD e classificado conforme MAPA (2022) (Tabela 1). As regras da classificação estão na Instrução Normativa (IN) 1/2022 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento em vigor desde 1º de julho de 2022.

Foram elaborados também os mapas de distribuição da Areia, Silte e Argila, realizado análise descritiva dos dados representativos dos perfis e os cálculos estatísticos utilizando o software RStudio® v.2022.

Tabela 1. Classes de água disponível

Classe	Água Disponível (mm/cm)	
	Limite inferior	Limite Superior
AD0	0	< 0,34
AD1	0,34	< 0,46
AD2	0,46	< 0,61
AD3	0,61	< 0,80
AD4	0,80	< 1,06
AD5	1,06	< 1,40
AD6	1,40	>

Fonte: adaptado de MAPA (2023).

Resultados e Discussão

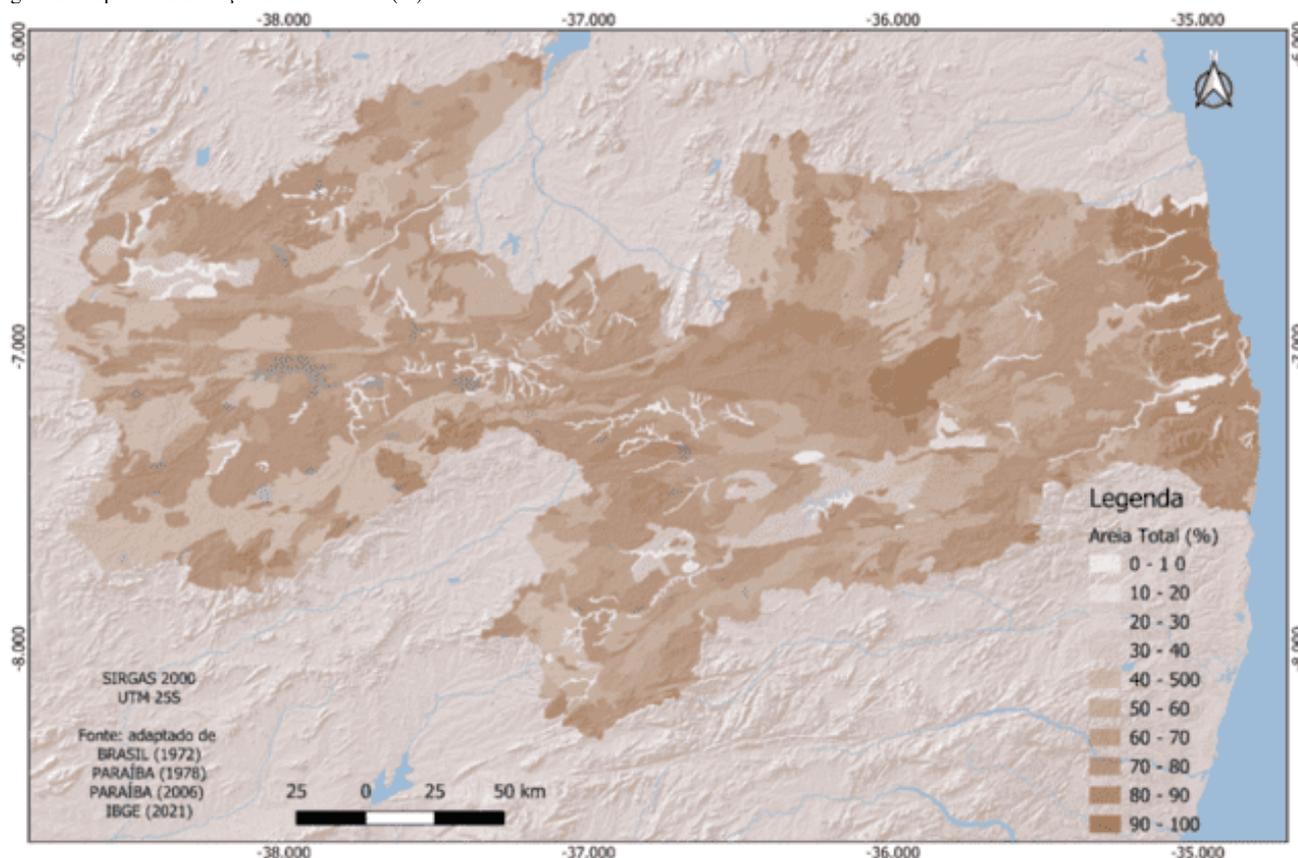
Na Figura 2, a porcentagem de Areia Total do solo acima dos 70% segue a ordem dos Espodosolos > Gleissolos > Neossolos > Plintossolos > Argissolos > Latossolos > Planossolos; e nas classes com menores teores de Areia Total, seguido pelos Luvisolos > Cambissolos > Vertissolos > Neossolos Flúvicos com os menores teores.

Na Tabela 2 são apresentados os valores dos parâmetros de determinação da Água Disponível obtidos e sua respectiva classificação em que, se pode observar a água disponível dos principais perfis de solos.

Na Figura 3 é apresentado a distribuição do teor de silte dos solos da Paraíba, sendo possível observar a distribuição descrita na análise dos perfis representativos dos boletins quanto a granulometria. A distribuição do Silte segue a ordem dos Neossolos Flúvicos > Vertissolos > Luvisolos > Argissolos > Latossolos > Neossolos > Planossolos > Plintossolos > Cambissolos > Gleissolos > Espodosolos.

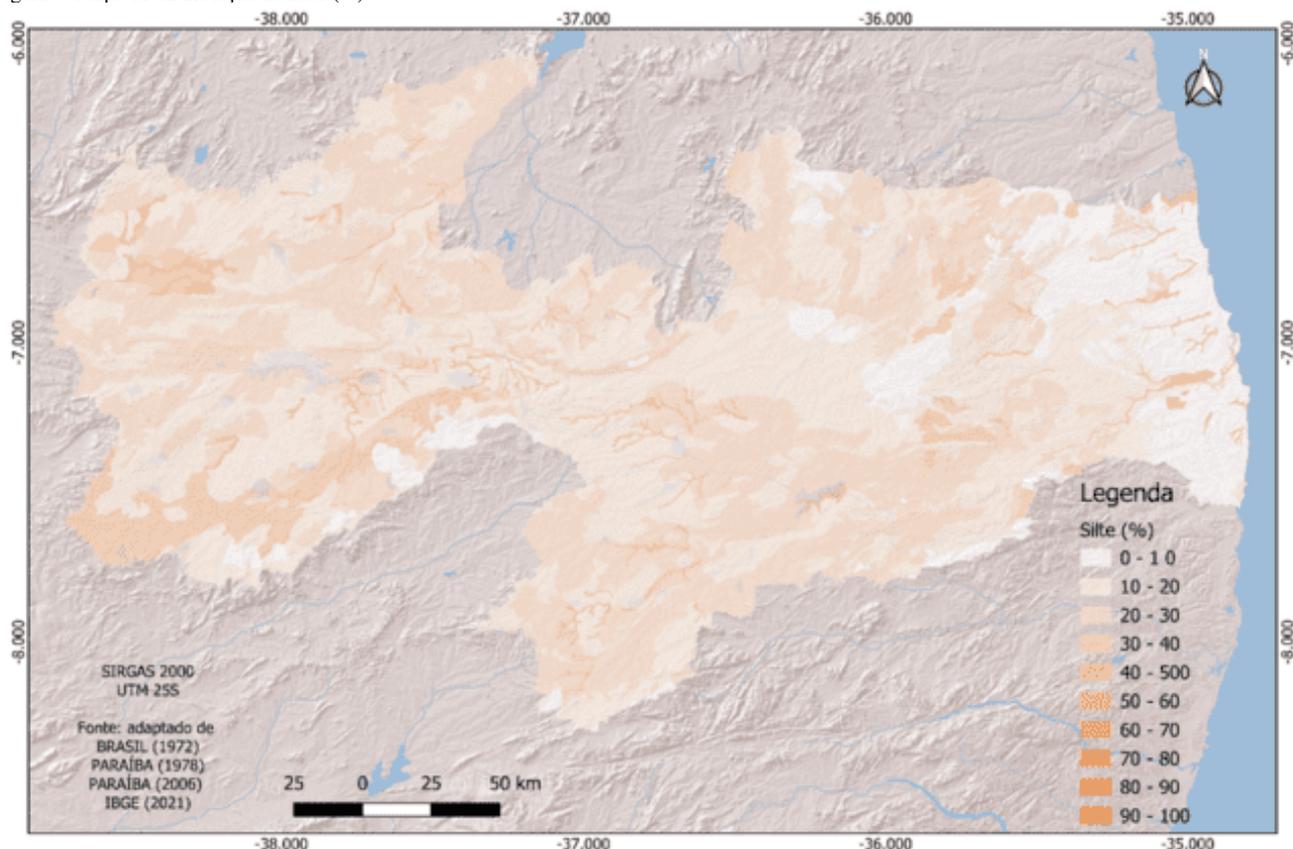
Na Figura 4, observa-se a sequência de ordens de solo, Neossolos Flúvicos > Plintossolos > Argissolos > Latossolos > Vertissolos > Cambissolos > Gleissolos > Luvisolos > Planossolos > Neossolos > Espodosolos.

Figura 2. Mapa de distribuição da Areia Total (%)



Fonte: Adaptado de BRASIL (1972); PARAÍBA (1978; 2006); IBGE (2021); ESRI (2022)

Figura 3. Mapa de distribuição da Silte (%)



Fonte: Adaptado de BRASIL (1972); PARAÍBA (1978; 2006); IBGE (2021); ESRI (2022)

Pelos resultados obtidos pode-se observar no mapa de Água Disponível (Figura 5) que a classe AD0 (< 0,34 mm/cm) distribuída em 1.075,20 km² (1,9%) (Tabela 3), que não são classificados para fins de risco climático, se localizam predominantemente na região litorânea do Estado, ao norte sob os Neossolos Quartzarênicos – RQ e ao sul sob os Espodosolos Ferri-humilúvicos – ESK. Mesmo os Neossolos Quartzarênicos sendo os mais profundos, seus teores de Areia Total facilitam a

drenabilidade da água como também a evaporação da mesma. De acordo com Cavalcante et al. (2005), as principais limitações à sua utilização agrícola, são a muito baixa fertilidade natural, baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, determinada pela sua textura arenosa, que inclusive dificulta as práticas de adubação que visam a ser feitas.

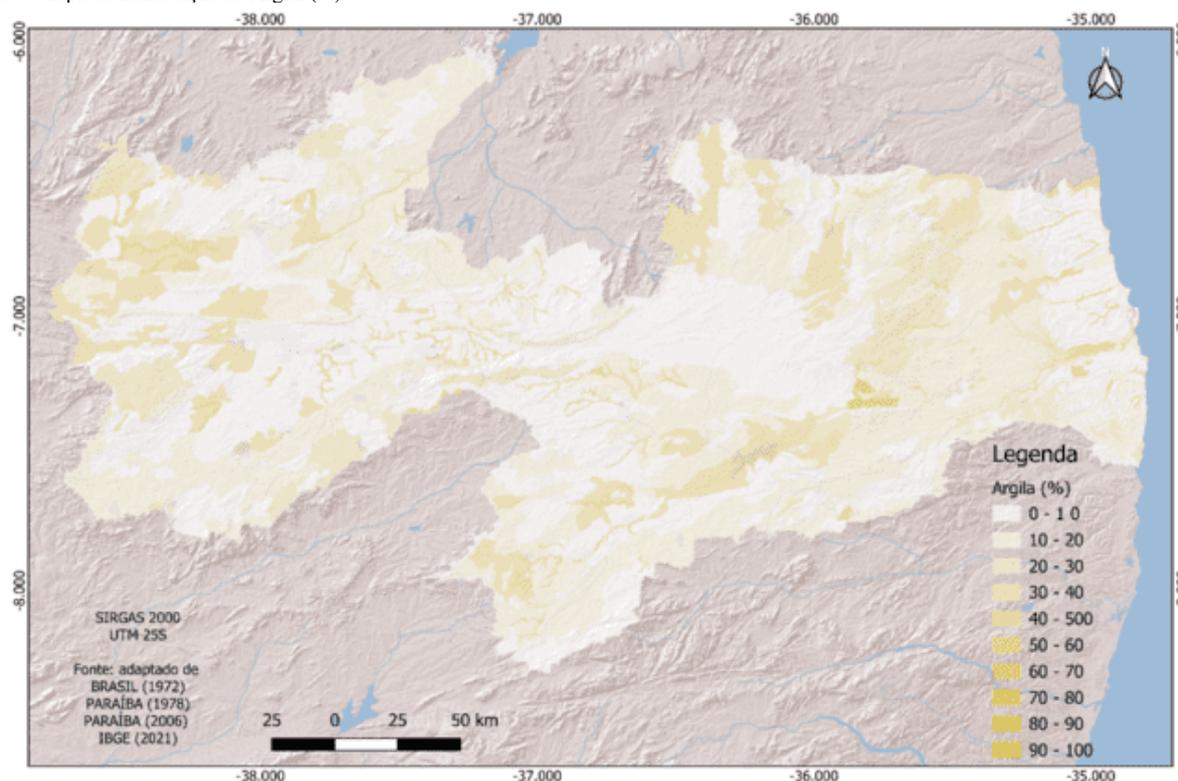
Tabela 2. Classes de Água Disponível e seus parâmetros

Localização	N.o Perfil	Classe de solos	Areia Total (%)	Silte (%)	Argila (%)	Água Disponível (mm/cm)***	Classe
Areia	1*	Latossolos Amarelos – LA	45	8	47	1,07	AD5
Alhandra	3*	Latossolos Amarelos – LA	72	6	22	0,75	AD3
Cuité	4	Latossolos Amarelos – LA	62	7	31	0,92	AD4
Araruna	6*	Latossolos Amarelos – LA	79	5	16	0,61	AD3
Mamanguape	7	Argissolos Acinzentados – PAC	87	4	9	0,44	AD1
Natuba	6	Argissolos Amarelos – PA	50	20	30	1,01	AD4
Pitimbu	8	Argissolos Amarelos – PA	85	6	9	0,48	AD2
Rio Tinto	9	Argissolos Amarelos – PA	90	4	6	0,37	AD1
Sapé	10	Argissolos Amarelos – PA	82	5	13	0,55	AD2
Pedras de Fogo	11	Argissolos Amarelos – PA	82	5	13	0,55	AD2
Sapé	18	Argissolos Amarelos – PA	87	6	7	0,44	AD1
Alhandra	3	Argissolos Vermelho-Amarelos – PVA	87	4	9	0,44	AD1
Princesa Isabel	12	Argissolos Vermelho-Amarelos – PVA	63	26	11	0,61	AD3
Jacaráú	19	Argissolos Vermelho-Amarelos – PVA	88	8	4	0,42	AD1
Areia	20	Argissolos Vermelho-Amarelos – PVA	62	22	16	0,93	AD4
Bonito de Santa Fé	13	Argissolos Vermelhos – PV	60	22	18	0,95	AD4
Teixeira	15	Argissolos Vermelhos – PV	49	26	25	1,06	AD5
Guarabira	21	Argissolos Vermelhos – PV	50	27	23	1,07	AD5
Lagoa Seca	22	Argissolos Vermelhos – PV	57	20	23	0,96	AD4
Alagoa Grande	23	Argissolos Vermelhos – PV	49	17	34	1,01	AD4
Jacaráú	19	Plintossolos Argilúvicos – FT	88	8	4	0,42	AD1
Teixeira	6*	Plintossolos Pétricos – FF	79	5	16	0,61	AD3
Pombal	24	Luvissolos Crômicos – TC	64	22	14	0,91	AD4

Monteiro	25	Luvissolos Crômicos – TC	41	26	33	1,09	AD5
Patos	26	Luvissolos Crômicos – TC	53	34	13	1,2	AD5
Solânea	27	Luvissolos Crômicos – TC	53	34	13	1,2	AD5
Sapé	28	Luvissolos Crômicos – TC	32	26	46	1,11	AD5
Ingá	29	Luvissolos Crômicos – TC	65	24	11	0,93	AD4
São Miguel de Taipu	30	Luvissolos Crômicos – TC	53	33	14	1,17	AD5
São Mamede	31	Luvissolos Crômicos – TC	53	33	14	1,17	AD5
Barra de Santa Rosa	32	Luvissolos Crômicos – TC	64	25	11	0,96	AD4
Cuité	33	Luvissolos Crômicos – TC	53	33	14	1,17	AD5
Gurinhém	34	Planossolos Háplicos – SX	69	21	10	0,85	AD4
Tacima	35	Planossolos Háplicos – SX	66	23	11	0,61	AD3
Tavares	16	Cambissolos Háplicos – CX	64	22	14	0,91	AD4
Princesa Isabel	36	Cambissolos Háplicos – CX	54	22	24	0,99	AD4
Taperoá	37	Cambissolos Háplicos – CX	66	18	16	0,85	AD4
Conceição	55	Cambissolos Háplicos – CX	50	33	17	1,17	AD5
Queimadas	39	Vertissolos Ebânicos – VE	46	25	29	1,06	AD5
Campina Grande	38	Vertissolos Háplicos – VX	32	26	46	1,11	AD5
Sousa	40	Vertissolos Háplicos – VX	15	33	52	1,21	AD5
Sumé	41	Vertissolos Háplicos – VX	15	33	52	1,21	AD5
Boqueirão	42	Vertissolos Háplicos – VX	44	21	35	1,04	AD4
Cubatí	43	Planossolos Nátricos – SN	78	13	9	0,64	AD3
Campina Grande	44	Planossolos Nátricos – SN	53	37	10	1,28	AD5
Uiraúna	45	Planossolos Nátricos – SN	80	15	5	0,62	AD3
Conde	46	Espodosolos Ferri-humilúvicos – ESK	95	2	3	0,27	AD0
Santa Rita	47	Neossolos Flúvicos – RY	9	50	41	1,62	AD6
S. José de Piranhas	48	Neossolos Litólicos – RL	63	22	15	0,92	AD4
Sant. dos Garrotes	49	Neossolos Litólicos – RL	22	59	19	1,82	AD6
Picuí	50	Neossolos Litólicos – RL	73	18	9	0,76	AD3
Umbuzeiro	51	Neossolos Litólicos – RL	53	2	35	0,99	AD4
Soledade	53	Neossolos Litólicos – RL	72	20	8	0,8	AD4
Piancó	56	Neossolos Litólicos – RL	72	20	8	0,8	AD4
Alagoinhas	59	Neossolos Litólicos – RL	67	20	13	0,86	AD4
Araruna	52	Neossolos Regolíticos – RR	77	13	10	0,65	AD3
Sousa	54	Neossolos Regolíticos – RR	70	25	5	0,91	AD4
Junco do Seridó	57	Neossolos Regolíticos – RR	80	15	5	0,62	AD3
Fagundes	58	Neossolos Regolíticos – RR	62	24	14	0,96	AD4
Solânea	60	Neossolos Regolíticos – RR	91	8	1	0,36	AD1
Livramento	62	Neossolos Regolíticos – RR	84	12	4	0,52	AD2
Teixeira	61	Neossolos Quartzarênicos – RQ	82	13	5	0,57	AD2
Campina Grande	63	Neossolos Quartzarênicos – RQ	91	8	1	0,36	AD1
Cabedelo	64	Neossolos Quartzarênicos – RQ	99	1	0	0,2	AD0
Conde	65**	Gleissolos Tiomórficos Órticos sálicos - GJ	81	7	12	0,56	AD2

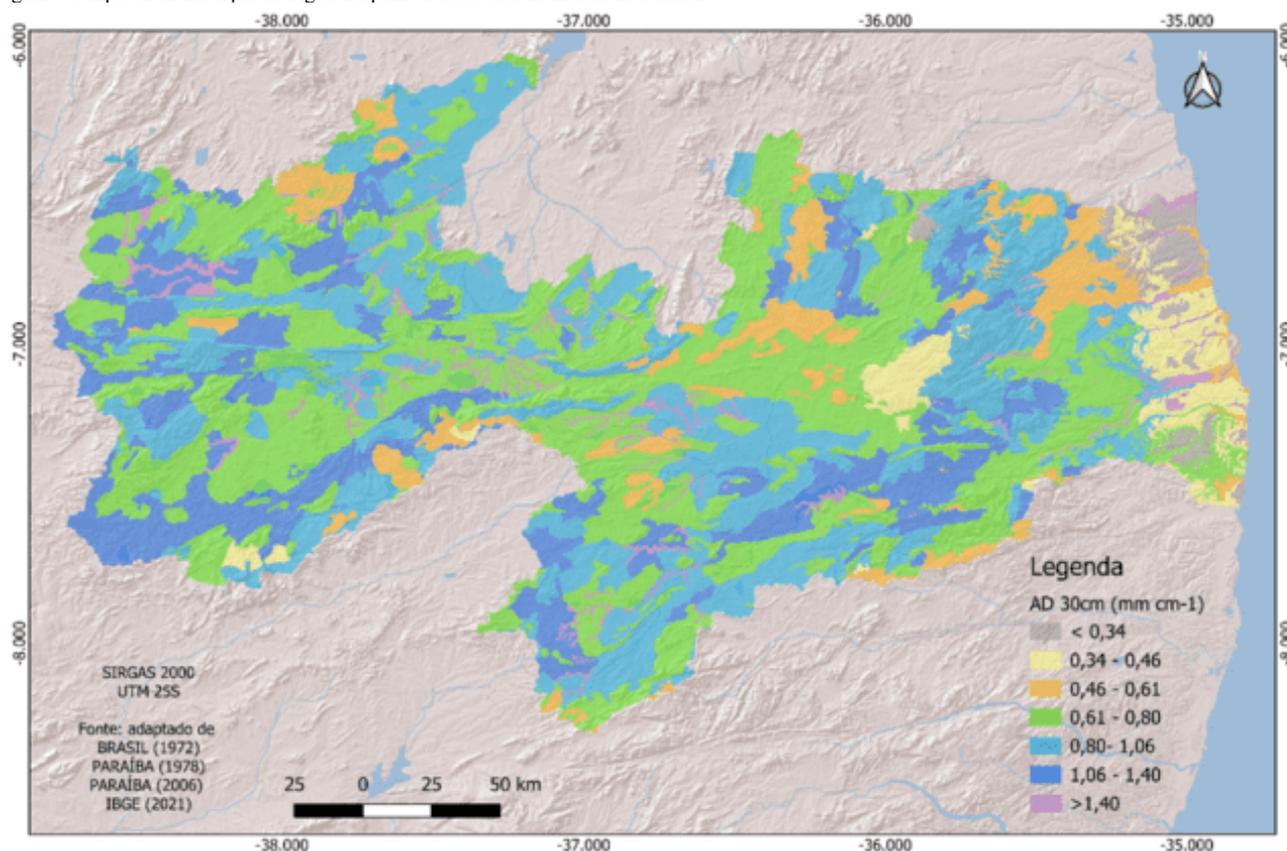
Fonte: Adaptado de BRASIL (1972); *PARAÍBA (1978); **EMBRAPA (2017); ***MAPA (2022)

Figura 4. Mapa de distribuição da Argila (%).



Fonte: Adaptado de BRASIL (1972); PARAÍBA (1978; 2006); IBGE (2021); ESRI (2022)

Figura 5. Mapa de distribuição da Água Disponível dos solos do Estado da Paraíba.



Fonte: Adaptado de BRASIL (1972); PARAÍBA (1978; 2006); IBGE (2021); ESRI (2022)

Tabela 3. Distribuição das classes de água disponível

Classe (mm/cm)	Área (km ²)	%
AD0 - < 0,34	1.075,20	1,90
AD1 - 0,34 a 0,46	2.365,79	4,19
AD2 - 0,46 a 0,61	4.381,67	7,76
AD3 - 0,61 a 0,80	21.168,17	37,49
AD4 - 0,80 a 1,06	16.330,78	28,92
AD5 - 1,06 a 1,40	9.497,53	16,82
AD6 - > 1,40	1.648,10	2,92
Total	56.467,24	100,00

As classes AD1 (0,34 a 0,46 mm/cm) e AD2 (0,46 a 0,61 mm/cm) estão representadas em 6.747,46 km² (11,95%). A classe AD1 ocorre na região litorânea sob os Argissolos em relevo plano e sob o Planalto da Borborema sob Neossolos Quartzarênicos. A classe AD2 ocorre no litoral sob os Gleissolos Tiomórficos e os Argissolos Vermelho-Amarelos, no terço médio do Estado e no Sertão na divisa com Pernambuco, e sob os Argissolos Vermelho, no Sertão, divisa com o Rio Grande do Norte.

Araújo Filho et al. (2022), afirmam que na região Nordeste as classes de AD, relacionam-se aos Neossolos Quartzarênicos; aos Neossolos Regolíticos de textura arenosa (cascalhenta); aos Planossolos Háplicos e Nátricos de textura arenosa e média/média; e aos Neossolos Litólicos de textura arenosa e média (cascalhenta). Resultado similar a este trabalho.

Este comportamento dos solos desta classe de AD pode ser explicado em que de acordo com Araújo Filho et al. (2022), a fração areia (total), ao contrário das frações finas, correlaciona-se negativamente com a retenção de água (PETERSEN et al., 1968), pois proporciona uma porosidade favorável à sua drenagem no solo.

As classes AD3 (0,61 a 0,80 mm/cm) e AD4 (0,80 a 1,06 mm/cm) estão distribuídas em 37.498,95 km² com maior representação em 66,41% da área. Estas áreas estão representadas pelos Latossolos, Argissolos, Luvisolos, Planossolos, Cambissolos, Neossolos Litólicos e Regolíticos. De acordo com Araújo Filho et al. (2022), esse comportamento dos Planossolos influencia significativamente na retenção de água, podendo a AD atingir até o dobro em comparação a um solo uniforme em profundidade. Este efeito ocorre devido à quebra de continuidade da porosidade entre os horizontes/camadas (ZETTL et al., 2011).

Na região Nordeste do Brasil, Araújo Filho (1992) demonstrou que Cambissolos argilosos e muito argilosos desenvolvidos de rochas calcárias e com forte microagregação retêm valores significativos de água em baixas tensões. As classes AD5 (1,06 a 1,40 mm/cm) e AD6 (> 1,40 mm/cm) representadas em 11.145,63 km² (19,74%) distribuídas no contraforte e sob o Planalto da Borborema e com maior representação no Sertão. Nestas áreas ocorrem em sua maioria os Luvisolos, seguido dos Vertissolos, Planossolos e Neossolos Flúvicos.

Estas características resultam da grande movimentação de massa do solo que se contrai e fendilha quando seco e se expande, quando úmido, tornando-se muito plástico e muito pegajoso, devido à presença de argilas expansíveis ou mistura destas com outros tipos de argilas minerais (BRASIL, 1972). O representante da classe AD6 é o Neossolo Flúvico, que de acordo com BRASIL (1972), são solos jovens com pouco desenvolvimento dos perfis. São solos derivados de sedimentos aluviais, com horizonte A assente sobre

horizonte C constituído de camadas estratificadas. É formado por deposições fluviais e mantêm as características do material de origem, os sedimentos percorrem longos trajetos a beira de rios e carregam consigo materiais que podem ser férteis ou não. A pouca espessura do solo é devida ao pouco tempo entre uma deposição fluvial e outra, não permitindo que os fatores de formação do solo atuem ativamente.

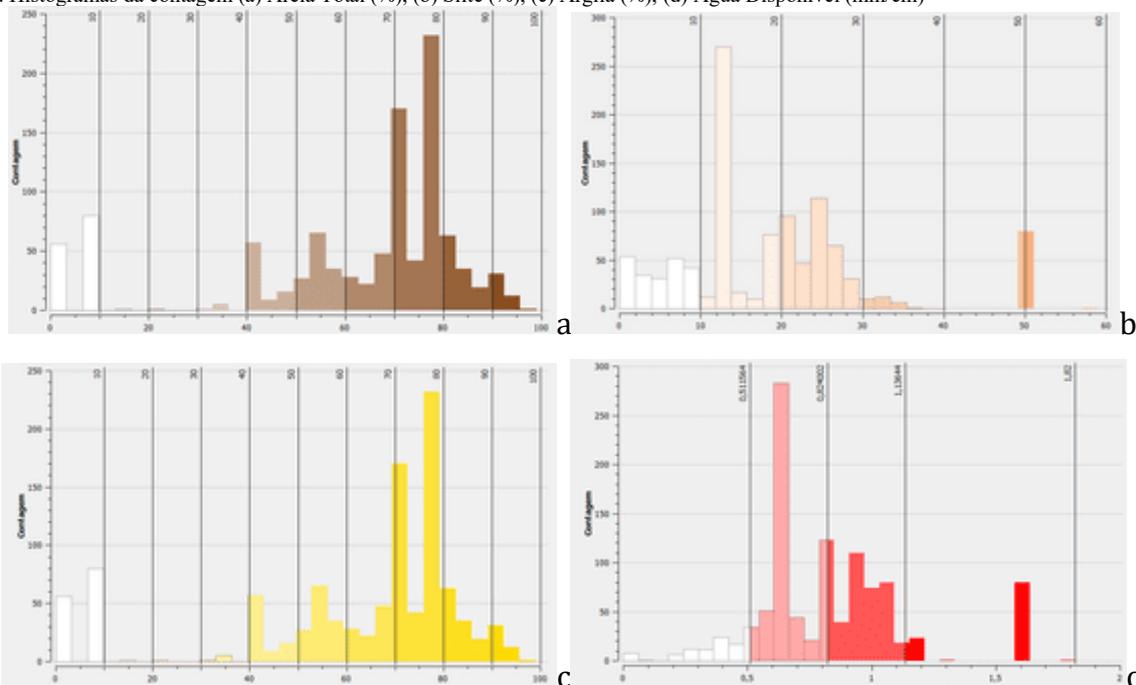
Observa-se que com o aumento dos teores de argila seguida pelos teores de silte, ocorre o aumento na limitação dos solos quanto à disponibilidade de água. De acordo com Araújo Filho et al. (2022), a Água Disponível (AD) aumenta significativamente das classes de textura arenosa até a média em função do aumento das frações finas (silte mais argila) e atinge o limite máximo nas classes de textura siltosa. A partir daí, como tendência geral, passa a ter um ligeiro decréscimo no sentido das classes de textura com predomínio da fração argila (WEIL e BRADY, 2017). Isso acontece porque as curvas que

delimitam a AD (Capacidade de Campo – CC e Ponto de Murcha Permanente - PMP) aumentam com taxas diferenciadas no sentido do aumento das frações finas.

O PMP aumenta praticamente de forma linear com as frações finas resultando no aumento de água não disponível às plantas em tenções muito altas. Por outro lado, a curva da CC cresce quase linearmente da faixa arenosa para a média, atingindo o máximo nas classes siltosas (COSTA et al., 2013) e, a partir daí, a taxa de crescimento é mínima, fazendo estreitar a faixa de AD.

Na Figura 6 apresenta-se os histogramas onde pode-se observar que para Areia Total (a) a maior frequência está entre 70 e 80% das amostras, para o Silte (b) a maior frequência se apresenta entre 10 e 30% das amostras, no histograma da Argila (c) apresenta-se entre 70 e 80% da frequência das amostras, para a Água Disponível (d) observa-se que a maioria dos valores se apresentam entre 0,5 e 1,0 (mm/cm) entre amostras estimadas.

Figura 6. Histogramas da contagem (a) Areia Total (%), (b) Silte (%), (c) Argila (%), (d) Água Disponível (mm/cm)



Para a garantia e qualidade das PTFs utilizadas, Chen et al. (1997) e Heuvelink (1998) sugerem que se deve fornecer dados estatísticos do conjunto de dados (média, desvio padrão, medianas, mínimo e máximo).

No resumo estatístico da descrição dos dados mapeados (Tabela 4) observa-se que a variável Areia Total apresenta o maior valor máximo entre as outras variáveis, e, portanto, o maior Desvio Padrão e com a maior

amplitude interquartil (IQR) apresentando maior dispersão estatística. A variável Água Disponível apresenta também dispersão dentre as amostras avaliadas.

Teixeira et al. (2021) utilizando uma base de dados com 1.021 amostras com dados obtiveram das frações areia total, silte, argila e água disponível valores médios de distribuição de 43, 26, 31 e 1,14, respectivamente.

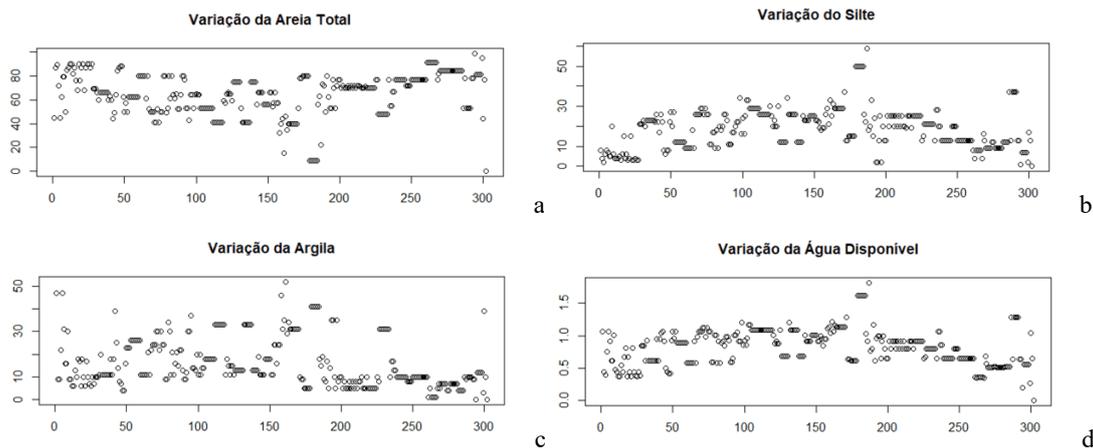
Tabela 4. Resumo estatístico

Variáveis	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão	Q1	Q3	IQR
Areia Total	0	61,25	99	24,92	53	77	24
Silte	0	18,63	59	12,06	12	25	13
Argila	0	14,73	52	11,07	8	18	10
Água Disponível	0	0,82	1,82	0,312	0,65	0,99	0,34

Na Figura 7 pode-se verificar as variáveis estudadas e sua distribuição das amostras em relação a porcentagem em que, Areia Total (Figura 7a) em sua maioria não ultrapassa a frequência dos 80 (%), o Silte

(Figura 7b) com média entre 20 (%), a Argila (Figura 7c) entre 30 e 40 (%), e Água Disponível (Figura 7d) em sua maioria não ultrapassando 1,0 (mm/cm) refletindo na distribuição espacial no mapa elaborado por este trabalho.

Figura 7. Variação dos teores de (a) Areia Total (%), (b) Silte (%), (c) Argila (%), (d) Água Disponível (mm/cm)



Costa e Soares (2021), observaram que a FPT proposta por Barros et al. (2013), com quatro parâmetros, foi a que apresentou melhor desempenho. Isso pode ser atribuído ao fato de ter sido desenvolvida com solos do Nordeste brasileiro, ou seja, solos com características pedológicas semelhantes. Teixeira et al. (2021) utilizou o mesmo banco de dados com 3 parâmetros, onde foi estimado para todo o território brasileiro na escala de trabalho generalizada em que foram utilizadas somente 9 amostras de perfis de solos do Estado da Paraíba, onde apresentou uma distribuição dos resultados mais generalizado dos perfis, devido ter utilizado o mapa de solos do IBGE em menor escala de trabalho.

Oliveira et al. (2002) afirmam que, as funções de pedotransferência tendem a ser tão mais acuradas quanto mais homogêneos forem os solos que compõem a base de dados e quanto mais próximos destes estiverem os que terão seus dados estimados. Resultado similar encontrado neste trabalho demonstrando boa capacidade preditiva.

Conclusão

O uso do sistema de informação geográfica e da modelagem proporcionaram a geoespacialização da estimativa de Água Disponível dos solos da área de estudo.

A estimativa da AD por pedotransferência utilizando descrição das amostras oriundos de mapas de escala menor possibilitou boa caracterização dos resultados.

A utilização de função de pedotransferência para estimar a AD em solos da Paraíba facilitou sua a determinação com rapidez e precisão, resultando em alternativa hábil e econômica.

A variável Areia Total apresentou maior dispersão e maiores valores de influência nas amostras com os maiores valores médios seguida pelo Silte e Argila.

A distribuição das classes de Água Disponível para os solos do Estado da Paraíba avaliados utilizando a função de pedotransferência com base nas frações granulométricas segue a ordem AD3 > AD4 > AD5 > AD2 > AD1 > AD6 > AD0.

Os mapas gerados por este trabalho podem proporcionar maior agilidade no conhecimento de propriedades do solo importantes no estudo da dinâmica e manejo da água e do solo, em especial a AD.

Referências

- ARAÚJO FILHO, J. C. de. **Infiltração e disponibilidade hídrica em Cambissolos do Baixo de Irecê-Bahia**. 224f. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Ciência do Solo). Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, 1992.
- ARAÚJO FILHO, J. C. DE; BARROS, A. H. C.; GALVÃO, P. V. M.; TEIXEIRA, W. G.; LIMA, E. DE P.; VICTORIA, D. DE C.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. DE; XAVIER, J. P. DE S.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; BACA, J. F. M.; MONTEIRO, J. E. B. DE A.; OLIVEIRA, F. C. S. F. DE; SILVA FILHO, A. D. DA; BARROS, J. P. F. G. **Avaliação, predição e mapeamento de água disponível em solos do Brasil**. 1.a ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2022. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento n. 282).
- ARRUDA, F. B.; ZULLO JR., J.; DE OLIVEIRA, J. B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 11-15, 1987.
- BARROS, A. H. C.; LIER Q. J. V.; MAIA, A. H. N.; SCARPARE, F. V. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 379-391, 2013.
- BERG, M. V. D.; KLAMT, E.; REEUWIJK, L. P. V.; SOMBROEK, W. G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, v. 78, p. 161-180, 1997.
- BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. **Soil Science Soc. Am. Journal**, v. 62, p. 743-749, 1998.
- BOSCHI, R. S.; BOCCS, F. F.; ASSAD, M. L. R. C. L.; ASSAD, E. D. How accurate are pedotransfer functions for bulk density for Brazilian soils? **Scientia Agricola**, v. 75, p. 70-78, 2018.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento Exploratório e Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba**. Rio de Janeiro. Convênio MA/CONTA/USAID/BRASIL, 1972. (Boletins DPFs-EPE-MA, 15 - Pedologia, 8).
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advanced Soil Science**, v. 9, p. 177-213, 1989.
- BUDIMAN, M.; MC BRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; SANTOS H. G. dos. **Revisão sobre funções de Pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 50p. (Documentos, n. 45).
- CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, v. 25, p. 183-188, 1995.
- CHEN, G.; YOST, R. S.; LI, Z. C.; WANG, X.; COX, F. R. Uncertainty analysis for knowledge-based decision aids: application to PDSS (Phosphorous Decision Support System). **Agricultural Systems**, v. 55, p. 461-471, 1997.

- COSTA, A. da; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. da; PÉRTILE, P.; SILVA, F. R. da. Water retention and availability in soils of the state of Santa Catarina-Brazil: effect of textural classes, soil classes and lithology. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1535-1548, 2013.
- COSTA, L. V. B.; SOARES, W. DE A. Avaliações de funções de pedotransferência para solos Brasileiros. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 4, p. 41-55, 2021.
- CAVALCANTE, F. de S.; DANTAS, J. S.; SANTOS, D.; CAMPOS, M. C. C. Considerações sobre a utilização dos principais solos no Estado da Paraíba. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v. 4, n. 8, p. 01-10, 2005.
- EMBRAPA. 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, 2017. 122p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento/Embrapa Solos).
- ESRI. Mapa Topográfico Mundial. Disponível em: <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=30e5fe3149c34df1ba922e6f5bbf808f>. Acesso em: novembro de 2022.
- FRANCISCO, P. R. M. **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, 2010.
- FRANCISCO, P. R. M.; CHAVES, I. DE B.; LIMA, E. R. V. DE. Classificação de terras para mecanização agrícola e sua aplicação para o Estado da Paraíba. **Revista Educação Agrícola Superior**, v. 28, n. 1, p. 30-35, 2013.
- FRANCISCO, P. R. M.; MEDEIROS, R. M. DE; SANTOS, D.; MATOS, R. M. DE. Classificação climática de Köppen e Thornthwaite para o Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.8, n.4, p.1006-1016, 2015.
- FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D.; OLIVEIRA, F. P. DE; RIBEIRO, G. DO N.; SILVA, V.F.; SILVINO, G. DA S. Atualização do mapa de solos do Estado da Paraíba utilizando geotecnologias. **Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology**, v.9, n.2, p.20-28, 2023.
- FUENTES-GUEVARA, M. D.; KOPP, L. M.; PEREIRA, T. S.; ROSA, T. R.; OLIVEIRA, L. M.; TIMM, L. C. Potencial das funções de pedotransferência em capturar a estrutura de dependência espacial do conteúdo de água no solo. In: **Encontro de Pós-graduação**, 21, 2019, Pelotas. Anais...Pelotas, 2019.
- GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 885-893, 2002.
- HEUVELINK, G. B. M. Error propagation in environmental modelling with GIS. 1.a v. Bristol, London: Taylor & Francis, 1998.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malhas territoriais.** 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 10 de abril de 2022.
- KLEIN, V.A. **Física do solo.** 2. ed. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2012. 240p.
- LIER, Q. J. van. **Índices da disponibilidade de água para as plantas.** In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. Tópicos em ciência do solo. v.1. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.95-106.
- LIN, H. S.; McINNES, K. J.; WILDING, L. P.; HALLMARK, C. T. Effects of soil morphology on hydraulic properties: II. Hydraulic pedotransfer functions. **Soil Science Soc. Am. Journal**, v. 63, p. 955-961, 1999.
- McBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; CATTLE, S. R.; VERVOORT, R. W. From pedotranfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, v. 109, p. 41-73, 2002.
- MARTINS, W. W. T. **Análise do desempenho de pedofunções par determinação da capacidade de campo.** 31f. Monografia (Graduação em Agronomia). Centro Universitário de Anápolis. UniEvangélica. Anápolis, 2019.
- MEDEIROS, J. C. **Funções de pedotransferência em estudos do funcionamento hídrico do solo da região sudoeste do Estado do Pará.** 120f. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2012.
- MELO, T. M.; PEDROLLO, O. C. Artificial Neural Networks for Estimating Soil Water Retention Curve Using Fitted and Measured Data. **Applied and Environmental Soil Science**, p. 1-16, 2015.
- MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B. D.; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 40, n. 4, p. 848-853, 2010.
- MONTEIRO, J. E. B. DE A.; VICTORIA, D. DE C.; FARIAS, J. R. B.; BARROS, A. H. C.; LIMA, E. DE P.; ARAÚJO FILHO, J. C. DE; SILVA, F. A. M. DA; EVANGELISTA, B. A.; TEIXEIRA, W. G. **Classes de água disponível do solo para uso no Zoneamento Agrícola de Risco Climático.** Comunicado Técnico 135. EMBRAPA. Campinas, 2022. 6p. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/estudos_observatorio-do-zarc/estudos-2022/2022JosEduardoBoffinodeAlmeidaMonteiroClassesdeguadisponveldosoloparausonoZoneamentoAgricoladeRiscoClimtico.pdf. Acesso em: 7 de abril de 2023.
- OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K. T.; CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos no Brasil: guia auxiliar para o seu reconhecimento.** 2.a ed. Jaboticabal, 1992. 201p.
- OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; RODRIGUES, J. J. V.; MARQUES, F. A. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 315-323, 2002.
- OLIVEIRA, L. M. **Imputação múltipla e funções de pedotransferência para estimativa da densidade de solos da Amazônia oriental.** 72f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal Rural da Amazônia. Belém, 2019.
- OLIVEIRA, L. B. de. **Mineralogia, micromorfologia, gênese e classificação de Luvisolos e Planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas no semiárido do Nordeste Brasileiro.** 169f. Tese (Doutorado em Fertilidade do solo e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2007.
- PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. **Development of pedotransfer functions in soil hydrology.** 1.a ed. Elsevier: Amsterdam, 2004. 512p.
- PARAÍBA. 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., 1978. 448p.
- PARAÍBA. 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, DF, 2006. 112p.
- PEQUENO, P. L. L.; FAGUNDES, F. P.; SANTOS, R. C.; SANTINI, C. L. A.; RAMBO, M. A.; SCHLINDWEIN, J. A. Uso de funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em um latossolo no estado de Rondônia. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, p. 229-239, 2018.
- PETERSEN, G. W.; CUNNINGHAM, R. L.; MATELSKI, R. P. Moisture characteristics of Pennsylvania soils: I. moisture retention as related to texture. **Soil Science Society of America Journal**, v. 32, n. 2, p. 271-275, 1968.
- QGIS. Development Team. 2022. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>.

RAWLS, W. J.; GISH, T. J.; BRAKENSIEK, D. L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advances in Agronomy**, v. 16, p. 213-234, 1991.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Manole, 2004. 478p.

RStudio. Posit Software. Disponível em: <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>.

SILVA, A. C. DA. **Modelos de pedotransferência aplicados na simulação das funções hidráulicas e da variabilidade espacial do solo**. 149f. Dissertação (Mestrado). Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

SILVA, Á. P. DA; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1-10, 2008.

SOUZA, P. G. C.; JÚNIOR, J. C. F. B.; VIANA, J. H. M. Curva de retenção e disponibilidade total de água em latossolos empregando funções de pedotransferência. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 25, p. 417-427, 2017.

TAVARES FILHO, J.; FELTRAN, C. T. M.; OLIVEIRA, J. F.; ALMEIDA, E.; GUIMARÃES, M. F. Atributos de solo determinantes para a estimativa do índice de estabilidade de agregados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 436-441, 2012.

TEIXEIRA, W. G.; VICTORIA, D. de C.; BARROS, A. H. C.; LUMBRERAS, J. F.; ARAUJO FILHO, J. C. de; SILVA, F. A. M. da; LIMA, E. de P.; BUENO FILHO, J. S. de S.; MONTEIRO, J. E. B. de A. **Predição da água disponível no solo em função da granulometria para uso nas análises de risco no Zoneamento Agrícola de Risco Climático**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 272. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/224270/1/CNPS-BPD-272-2021.epub>. Acesso em: 7 de abril de 2023.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, v. 163, p. 190-202, 1998.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Soc. Am. Journal**, v. 64, p. 327-338, 2000.

VEREECKEN, H.; WEYNANTS, M.; JAVAUX, M.; PACHEPSKY, Y.; SCHAAP, M. G.; GENUCHTEN, M.T.H. VAN. Using Pedotransfer Functions to Estimate the van Genuchten-Mualem Soil Hydraulic Properties: A Review. **Vadose Zone Journal**, v. 9, n. 4, p.795-820, 2010.

UNGER, P. W. Soil profile gravel layers: I. effect on water storage, distribution, and evaporation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 35, n. 4, p. 631-634, 1971.

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

WEIL, R. R.; BRADY, N. C. **The nature and properties of soils**. 15a ed. Harlow: Pearson, 2017.

WHITE, R. E. **Princípios e práticas da ciência do solo. O solo como um recurso natural**. 4 ed. São Paulo, 2009. 587p.

WÖSTEN, J. H. M.; PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, v. 251, p. 123-150, 2001.

ZETTL, J. D.; BARBOUR, S. L.; HUANG, M.; SI, B. C.; LESKIW, L. A. Influence of textural layering on field capacity of coarse soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 91, n. 2, p. 133-147, 2011.