

Estimativa e modelagem do estoque de carbono superficial dos solos do Estado da Paraíba

Estimate and modeling of surface carbon stock of soils in the State of Paraíba

Estimación y modelización del stock de carbono superficial en suelos del Estado de Paraíba

Paulo Roberto Megna Francisco
Universidade Federal da Paraíba
paulomegna@ig.com.br

Djail Santos
Universidade Federal da Paraíba
santosdjail@gmail.com

Flávio Pereira de Oliveira
Universidade Federal da Paraíba
flavio.oliveira@academico.ufpb.br

Viviane Farias Silva
Universidade Federal de Campina Grande
viviane.farias@professor.ufcg.edu.br

George do Nascimento Ribeiro
Universidade Federal de Campina Grande
george@ufcg.edu.br

Gypson Dutra Junqueira Ayres
Universidade Federal de Campina Grande
fgypson@gmail.com

Raimundo Calixto Martins Rodrigues
Universidade Estadual do Maranhão
calixto_80@hotmail.com

Resumo

Este trabalho objetivou modelar e estimar o estoque de carbono superficial para as terras do Estado da Paraíba utilizando técnicas de geoprocessamento. Utilizou-se dos dados das análises físicas e químicas descritos nos perfis representativos de do Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba e do Zoneamento Agropecuário. A densidade dos solos foi estimada pelo método de modelagem por pedotransferência e realizada a estimativa do Estoque de Carbono adotada camada superficial de 30 cm. Os resultados demonstraram que a utilização das técnicas de geoprocessamento proporcionou resultados com rapidez e precisão. A estimativa por pedotransferência da densidade dos solos apresentou resultados satisfatórios e compatíveis. A densidade dos solos distribuiu-se em 47,30% da área entre 2,0 a 2,3 g cm⁻³. Áreas com até 75 Mg ha⁻¹ de Estoque de Carbono totalizaram 82,79% do Estado. Os valores médios de EC seguiram a ordem dos Gleissolos > Argissolos Acinzentados > Neossolos Flúvicos > Argissolos Amarelos > Vertissolos Ebânicos > Luvissolos Crônicos > Cambissolos Háplicos > Vertissolos Háplicos > Neossolos Litólicos > Argissolos Vermelho Amarelo > Latossolos Amarelos >

Planossolos Háplicos > Neossolos Regolíticos > Planossolos Nátricos > Plintossolos > Espodossolos > Neossolos Quartzarênicos > Plintossolos Argilúvicos.

Palavras-chave: Densidade do solo. Teor de argila. Saturação de bases. Carbono orgânico. Simulação.

Abstract

This work aimed to model and estimate the surface carbon stock for land in the State of Paraíba using geoprocessing techniques. Data from the physical and chemical analyzes described in the representative profiles of the Exploratory Survey and Recognition of Soils in the State of Paraíba and the Agricultural Zoning were used. Soil density was estimated using pedotransfer modeling method and carbon stock was estimated using a 30 cm surface layer. The results showed that the use of geoprocessing techniques provided results quickly and accurately. The pedotransfer estimation of soil density showed satisfactory and compatible results. Soil density was distributed over 47.30% of the area between 2.0 and 2.3 g cm⁻³. Areas with up to 75 Mg ha⁻¹ of Carbon Stock totaled 82.79% of the State. The average EC values followed the order of Gleissoils > Gray Argisols > Fluvial Neosols > Yellow Argisols > Ebanic Vertisols > Chromic Luvisols > Haplic Cambisols > Haplic Vertisols > Litholic Neosols > Red Yellow Argisols > Yellow Oxisols > Haplic Planosols > Regolic Neosols > Natic Planosols > Plinthsoils > Spodosols > Quartzarenic Neosols > Argilúvic Plinthsoils.

Keywords: Soil density. Clay content. Base saturation. Organic carbon. Simulation.

Resumen

Este trabajo tuvo como objetivo modelar y estimar el stock de carbono superficial para terrenos en el Estado de Paraíba utilizando técnicas de geoprocесamiento. Fueron utilizados los datos de los análisis físicos y químicos descritos en los perfiles representativos del Levantamiento Exploratorio y Reconocimiento de Suelos en el Estado de Paraíba y la Zonificación Agrícola. La densidad del suelo se estimó utilizando el método de modelado por pedotransferencia y el stock de carbono se estimó utilizando una capa superficial de 30 cm. Los resultados mostraron que el uso de técnicas de geoprocесamiento proporcionó resultados de forma rápida y precisa. La estimación por pedotransferencia de la densidad del suelo mostró resultados satisfactorios y compatibles. La densidad del suelo se distribuyó en el 47,30% del área entre 2,0 y 2,3 g cm⁻³. Las áreas con hasta 75 Mg ha⁻¹ de Stock de Carbono totalizaron el 82,79% del Estado. Los valores promedio de stock de carbono siguieron el orden de Gleissoils > Argisoles grises > Neosoles fluviales > Argisoles amarillos > Vertisoles ebanicos > Luvisoles crómicos > Cambisoles hápicos > Vertisoles hápicos > Neosoles líticos > Argisoles amarillos rojos > Oxisoles amarillos > Planosoles hápicos > Neosoles regolíticos > Nátricos Planosoles > Plinthsoles > Spodosoles > Neosoles cuarzoarénicos > Plinthsoles Argilúvic.

Palabras clave: Densidad del suelo. Contenido de arcilla. Saturación de bases. Carbón orgánico. Simulación.

Introdução

A presença de matéria orgânica nos solos é de grande importância, uma vez que ela é o principal agente gerador de cargas elétricas negativas responsáveis pela retenção de nutrientes e água, pela agregação do solo, além de servir de substrato e contribuir para a manutenção da diversidade biológica do solo (SILVA et al., 2004).

A matéria orgânica do solo (MOS), composta predominantemente de todo o carbono (C) orgânico presente no solo, está relacionada com a maioria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo e do ambiente (ROSCOE & MACHADO, 2002), e a maior concentração são encontradas na fração silte e argila (D'ANDRÉA et al., 2004). Níveis adequados de carbono no solo minimizam o impacto dos cultivos no ambiente, reduzindo os processos erosivos e preservando a biodiversidade do solo (SIX et al., 2002).

O carbono no solo pode ser encontrado principalmente como componente mineral, em estruturas de carbonatos (CaCO_3 , MgCO_3 , etc.). Na determinação do carbono orgânico (C org) em solo via úmida pela oxidação com o dicromato de potássio, apenas aquele proveniente de materiais orgânicos facilmente oxidáveis ou decomponíveis é quantificado, sendo discriminado o oriundo de compostos carbonáticos ou recalcitrantes como o carvão (WALKLEY & BLACK, 1934).

O estoque de carbono de um solo representa o balanço dinâmico entre a adição de material vegetal morto e a perda pela decomposição ou mineralização (SCHOLES et al., 1997). Este estoque, calculado a partir dos dados de carbono orgânico, como outros atributos do solo, além de variar no tempo, varia também no espaço (CMBARDELLA et al., 1994). Os estoques de carbono no solo são frequentemente calculados considerando a densidade do solo e a espessura da camada estudada (ELLERT & BETTANY, 1995).

Devido à dificuldade na obtenção de medidas diretas de mudança de carbono no solo, IPCC/UNEP/OECD/IEA (ONU, 1997) reconhecem a importância da estimativa do estoque de carbono dos solos para o inventário. Estimativas de estoque de carbono nos solos do Brasil, são poucas e se deparam com a falta de informações disponíveis sobre a quantidade de carbono orgânico nos solos (FIDALGO et al., 2007). Estimativas do estoque de carbono do solo dependem da disponibilidade de dados sobre conteúdo de carbono (g de C kg^{-1} de solo) e densidade do solo (DS). Valores da DS são necessários para converter o conteúdo de carbono como porcentagem do peso seco para peso de carbono por unidade de área (HOWARD et al., 1995).

Funções de pedotransferência (PTFs) para determinação da DS foram desenvolvidas a partir de conjuntos de dados específicos (BERNOUX et al., 1998; HAN et al., 2012; HONG et al., 2013), entre outros. De acordo com Boschi et al. (2015), a estimativa de DS pode ser feita por meio de diferentes atributos de solos de fácil determinação. As frações argila, areia e silte são conhecidas por terem efeito sobre a DS (MANRIQUE & JONES, 1991; DE VOS et al., 2005). Kaur et al. (2002) utilizaram teores de argila, silte, areia e C. No Brasil, Bernoux et al. (1998), Tomasella e Hodnett (1998) e Benites et al. (2007) usaram os atributos teores de argila, silte, C e o pH em água.

Portanto, propõe-se neste trabalho para as terras do Estado da Paraíba, modelar e estimar o estoque de carbono superficial utilizando técnicas de geoprocessamento.

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).

O uso atual e a cobertura vegetal caracterizam-se por formações florestais definidas, como Caatinga Arbustiva Arbórea Aberta, Caatinga Arbustiva Arbórea Fechada, Caatinga Arbórea Fechada, Tabuleiro Costeiro, Mangues, Mata-úmida, Mata semidecidual, Mata Atlântica e Restinga (PARAÍBA, 2006).

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 Luvissolos crônicos, 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).

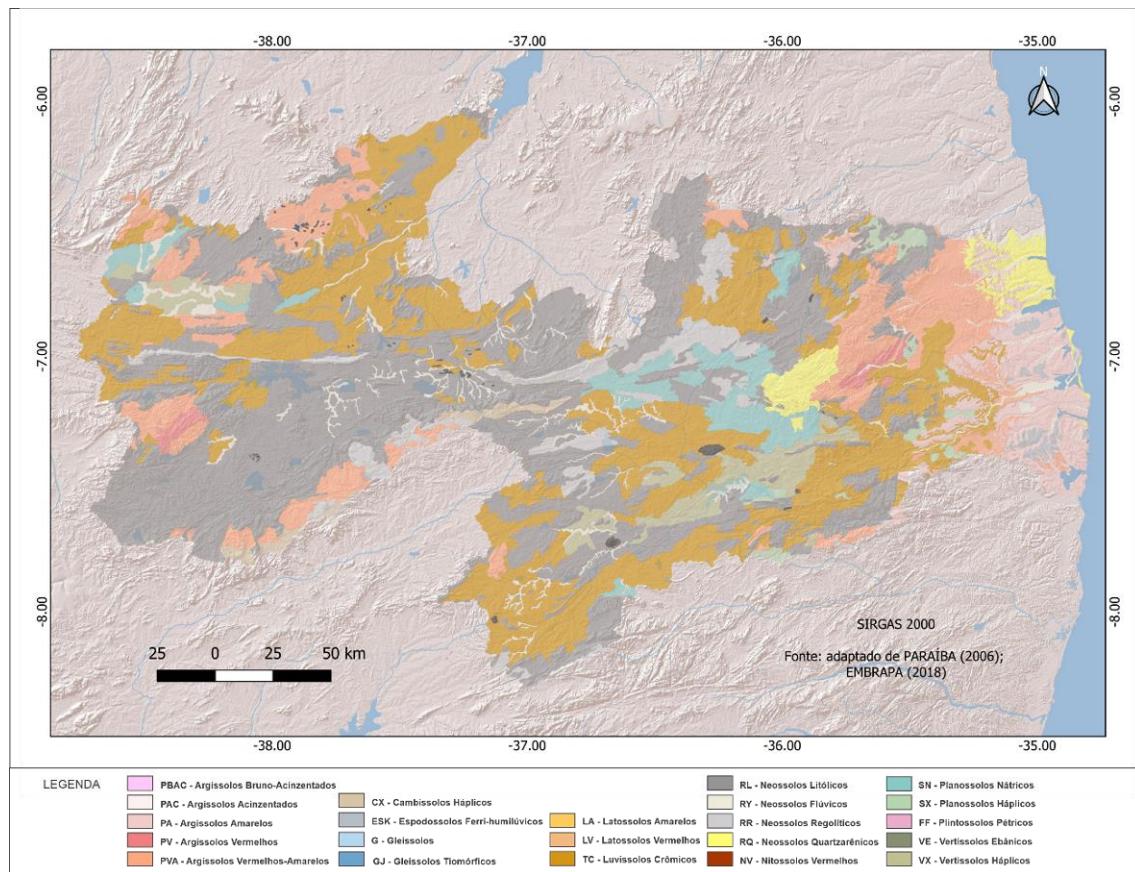


Figura 1 - Solos do Estado da Paraíba.

Fonte: adaptado de PARAÍBA (2006); IBGE (2021); EMBRAPA (2018); ESRI (2022).

Para a elaboração do mapa de estoque de carbono foi criada uma planilha no Excel[©] onde utilizou-se dos dados das análises físicas e químicas como Argila (g kg^{-1}), Carbono Orgânico (g kg^{-1}) e Saturação de Bases (%) descritos nos perfis representativos de BRASIL (1972) (Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba) e PARAÍBA (1978) (Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba).

A partir dos dados obtidos, a Densidade dos solos foi estimada pelo método de modelagem por pedotransferência desenvolvido por Benites et al. (2007), que apresenta R^2 de 0,66 para os solos brasileiros ($1,36 \text{ g cm}^{-3}$) (Equação 1).

$$Ds = 1,560 - 0,0005(\text{Argila}) - 0,010(\text{COT}) + 0,0075(\text{SB}) \quad (\text{Eq.1})$$

Em que: DS - Densidade do solo (g cm^{-3}); argila (g kg^{-1}); COT - carbono orgânico (g kg^{-1}); SB – Saturação por Bases (%).

A estimativa do Estoque de Carbono dos solos foi calculada pela expressão de Veldkamp (1994) (Equação 2). A espessura do solo adotada foi a camada superficial de 30 cm.

$$EC = CO \times DS \times z \text{ (Eq.2)}$$

Em que: EC - estoque de carbono orgânico ($Mg\ ha^{-1}$); CO - carbono orgânico ($g\ kg^{-1}$); DS - densidade do solo ($g\ cm^{-3}$); z - espessura (cm).

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 com seus limites atualizados (IBGE, 2021). Em seguida, utilizando a tabela de atributos do Sistema de Informação Geográfica, os polígonos dos solos foram classificados com os valores obtidos de Argila (AR), Carbono Orgânico (CO), Saturação de Bases (SB) e pelas estimativas obtidas dos cálculos de Densidade (DS) e de Estoque de Carbono dos solos (EC).

Após foram elaborados os respectivos mapas conforme a Tabela 1 e no tratamento estatístico foi realizada a análise descritiva dos dados utilizando o QGIS[©] e a calculadora *raster* e o plugin GRASS[®] *r.report* para os cálculos de áreas.

Tabela 1 - Classificação dos parâmetros e da modelagem

Saturação de Bases (%)	Argila ($g\ kg^{-1}$)	Carbono Orgânico ($g\ kg^{-1}$)	Densidade ($g\ cm^{-3}$)	Estoque de Carbono ($Mg\ ha^{-1}$)
0-20	0-10	0-0,5	0-1,0	0-25
20-30	10-20	0,5-1,0	1,0-1,5	25-50
30-50	20-30	1,0-1,5	1,5-1,8	50-75
50-60	30-40	1,5-2,0	1,8-2,0	75-100
60-80	40-50	2,0-2,5	2,0-2,3	100-125
80-90	50-60	2,5-3,0		125-150
90-100		3,0-3,5		150-175
		3,5-4,0		175-200
				200-225
				225-250

Resultados e Discussão

Pelos resultados obtidos pode-se observar na Figura 2 a distribuição espacial dos dados de AR, CO, SB e os dados estimados de DS.

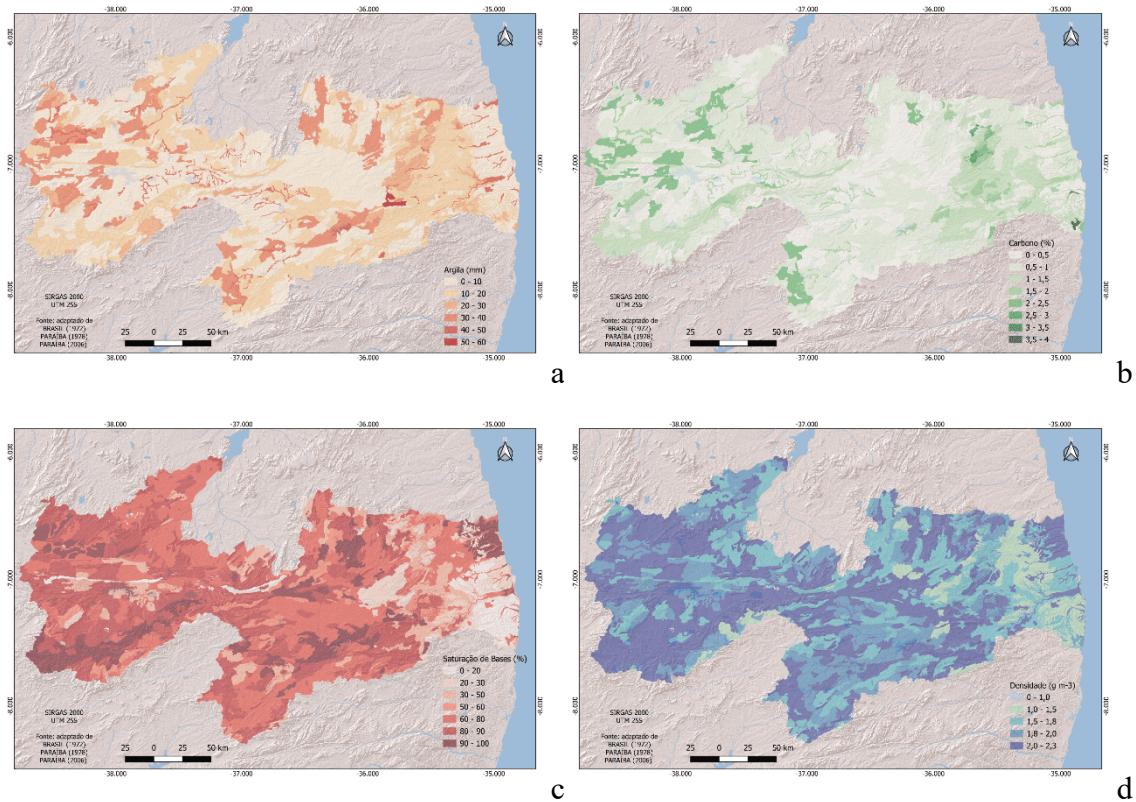


Figura 2 - (a) Argila (mm) (g kg^{-1}); (b) Carbono (g kg^{-1}); (c) Saturação de Bases (%); (d) Densidade (g cm^{-3}) (%). Fonte: adaptado de BRASIL (1972); PARAÍBA (1978; 2006); IBGE (2021); ESRI (2023).

Na Tabela 2 são apresentados os valores dos parâmetros de determinação da densidade e do estoque de carbono do solo.

Tabela 2 - Parâmetros da modelagem da densidade e do estoque de carbono do solo

Município/ Amostra	N.º Perfil	Classe de solos	Argila (g kg^{-1})	CO (g kg^{-1})	SB (%)	Densidade (g cm^{-3})	Estoque de Carbono (Mg ha^{-1})	Média Est. Carbono
Areia	1*	Latossolos Amarelos - LA	47	2,05	3	1,32	81,18	
Litoral	3*	Latossolos Amarelos - LA	22	1,06	3	1,51	48,02	
Cuité	4	Latossolos Amarelos - LA	29	0,74	45	1,88	41,64	
Araruna	6*	Latossolos Amarelos - LA	16	0,65	42	1,32	25,74	49,14
Mamanguape	7	Argissolos Acinzentados - PAC	8	3	51	1,91	171,77	171,77
Natuba	6	Argissolos Amarelos - PA	30	2,32	43	1,84	128,36	
Pitimbu	8	Argissolos Amarelos - PA	8	3	51	1,91	171,77	
Rio Tinto	9	Argissolos Amarelos - PA	6	0,77	16	1,67	38,56	
Sapé	10	Argissolos Amarelos - PA	13	1,22	24	1,72	63,00	
Pedras de Fogo	11	Argissolos Amarelos - PA	15	1,98	5	1,57	93,27	
Sapé	18	Argissolos Amarelos - PA	7	0,54	39	1,84	29,87	87,47
Alhandra	3	Argissolos Vermelho-Amarelos - PVA	9	0,53	19	1,69	26,91	
Princesa Izabel	12	Argissolos Vermelho-Amarelos - PVA	11	1,77	100	2,29	121,43	
Jacaraú	19	Argissolos Vermelho-Amarelos - PVA	4	0,29	48	1,92	16,66	
Areia	20	Argissolos Vermelho-Amarelos - PVA	16	0,87	26	1,74	45,37	52,59
Bonito de S. Fé	13	Argissolos Vermelhos - PV	18	2,8	65	2,01	168,88	
Teixeira	15	Argissolos Vermelhos - PV	25	1,56	88	2,19	102,58	
Guarabira	21	Argissolos Vermelhos - PV	23	1,58	42	1,85	87,58	
Lagoa Seca	22	Argissolos Vermelhos - PV	23	1,82	55	1,94	106,08	

Alagoa Grande	23	Argissolos Vermelhos – PV	30	1,26	74	2,09	78,90	108,80
Jacaraú	19	Plintossolos Argilúvicos – FT	4	0,29	48	1,92	16,66	16,66
Teixeira	6*	Plintossolos Pétricos – FF	16	0,65	42	1,32	25,74	25,74
Pombal	24	Luvissolos Crônicos – TC	14	0,73	80	2,15	46,99	
Monteiro	25	Luvissolos Crônicos – TC	33	2,33	85	2,16	150,82	
Patos	26	Luvissolos Crônicos – TC	18	0,82	87	2,20	54,00	
Solânea	27	Luvissolos Crônicos – TC	13	0,6	77	2,13	38,25	
Sapé	28	Luvissolos Crônicos – TC	20	1,25	75	2,10	78,75	
Ingá	29	Luvissolos Crônicos – TC	11	0,91	78	2,13	58,16	
São Miguel de Taipu	30	Luvissolos Crônicos – TC	25	2,21	100	2,28	150,86	
São Mamede	31	Luvissolos Crônicos – TC	14	1,36	79	2,13	86,98	
Barra de Santa Rosa	32	Luvissolos Crônicos – TC	11	1	100	2,29	68,84	
Cuité	33	Luvissolos Crônicos – TC	8	0,2	94	2,26	13,55	74,72
Gurinhém	34	Planossolos Háplicos – SX	10	0,78	74	2,10	49,19	
Tacima	35	Planossolos Háplicos – SX	11	0,7	73	2,10	44,00	46,59
Tavares	16	Cambissolos Háplicos – CX	14	0,94	81	2,15	60,66	
Princesa Izabel	36	Cambissolos Háplicos – CX	24	1,1	88	2,20	72,50	
Taperoá	37	Cambissolos Háplicos – CX	16	0,66	65	2,03	40,25	
Conceição	55	Cambissolos Háplicos – CX	17	1,18	92	2,23	78,93	63,09
Queimadas	39	Vertissolos Ebânicos – VE	30	1,24	91	2,22	82,40	82,40
Campina Grande	38	Vertissolos Háplicos – VX	46	0,65	100	2,28	44,47	
Souza	40	Vertissolos Háplicos – VX	52	0,51	100	2,28	34,87	
Sumé	41	Vertissolos Háplicos – VX	28	1,53	94	2,24	102,62	
Boqueirão	42	Vertissolos Háplicos – VX	35	1,03	97	2,26	69,82	62,95
Cubati	43	Planossolos Nátricos – SN	9	0,72	71	2,08	44,95	
Campina Grande	44	Planossolos Nátricos – SN	10	0,79	74	2,10	49,82	
Uiraúna	45	Planossolos Nátricos – SN	5	0,43	93	2,25	29,03	41,27
Conde	46	Espodossolos Ferri-humílicos – ESK	3	0,41	15	1,67	20,50	20,50
Santa Rita	47	Neossolos Flúvicos – RY	41	1,9	73	2,07	117,88	117,88
São José de Piranhas	48	Neossolos Litólicos – RL	15	0,83	68	2,05	51,15	
Santana dos Garrotes	49	Neossolos Litólicos – RL	14	1,66	88	2,20	109,38	
Picuí	50	Neossolos Litólicos – RL	9	0,35	82	2,17	22,75	
Umbuzeiro	51	Neossolos Litólicos – RL	35	0,82	55	1,95	47,89	
Soledade	53	Neossolos Litólicos – RL	8	0,56	85	2,19	36,76	
Piancó	56	Neossolos Litólicos – RL	10	0,44	53	1,95	25,71	
Alagoinhas	59	Neossolos Litólicos – RL	13	1,7	56	1,96	99,78	56,20
Araruna	52	Neossolos Regolíticos – RR	10	0,93	76	2,12	59,03	
Souza	54	Neossolos Regolíticos – RR	5	0,33	44	1,88	18,65	
Junco do Seridó	57	Neossolos Regolíticos – RR	5	0,47	71	2,09	29,40	
Fagundes	58	Neossolos Regolíticos – RR	14	1,65	85	2,17	107,61	
Solânea	60	Neossolos Regolíticos – RR	7	0,33	57	1,98	19,61	
Livramento	62	Neossolos Regolíticos – RR	2	0,93	100	2,30	64,16	49,74
Teixeira	61	Neossolos Quartzarénicos – RQ	5	0,38	48	1,91	21,82	
Campina Grande	63	Neossolos Quartzarénicos – RQ	1	0,4	18	1,69	20,29	
Cabedelo	64	Neossolos Quartzarénicos – RQ	0	0,25	94	2,26	16,97	19,69
Conde	**	Gleissolos Tiomórficos Órticos sálicos - GJ	3	0,41	15	1,67	20,50	
Conde	**	Gleissolos - G	3	0,41	15	1,67	20,50	237,18

Fonte: BRASIL (1972); *PARAÍBA (1978); **EMBRAPA (2017); EMBRAPA (2018).

Na Tabela 3 pode-se observar a distribuição das classes referente aos parâmetros físicos e químicos dos perfis, da estimativa da DS e do EC.

Tabela 3 - Distribuição dos parâmetros

Saturação de Bases (%)		Argila (g kg ⁻¹)		Carbono (g kg ⁻¹)		Densidade (g cm ⁻³)		Estoque de Carbono (Mg ha ⁻¹)	
Área (km ²)	(%)	Área (km ²)	(%)	Área (km ²)	(%)	Área (km ²)	(%)	Área (km ²)	(%)
4.953,12	8,77	26.367,14	46,69	15.121,76	26,78	72,4	0,13	14.477,84	25,64
302,76	0,54	18.145,44	32,13	27.681,26	49,02	4.366,21	7,73	20.864,11	36,95
5.550,41	9,83	3.195,51	5,66	7.223,93	12,79	15.917,61	28,19	11.406,13	20,20
1.936,7	3,43	6.934,88	12,28	2.721,56	4,82	9.399,92	16,65	4.017,50	7,11
27.090,28	47,98	1.707,35	3,02	3.557,22	6,30	26.711,1	47,30	2.180,28	3,86
9.855,71	17,45	1.16,91	0,21	1.12,45	0,20	-	-	25,00	0,04
6.778,26	12,00	-	-	0	0,00	-	-	3.447,34	6,11
-	-	-	-	49,04	0,09	-	-	0	0
-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
-	-	-	-	-	-	-	-	49,04	0,09
56.467,24	100	56.467,24	100	56.467,24	100	56.467,24	100	56.467,24	100

Na Figura 2a de espacialização da AR pode-se observar que, apresenta 26.367,14 km² representando 46,69% do total distribuída na maioria dos solos com valores de 0 a 10 g kg⁻¹, seguida de 10 a 20 g kg⁻¹ em 32,13% e de 30 a 40 g kg⁻¹ em 12,28% do Estado. De acordo com a Tabela 3 dos parâmetros dos dados, a AR apresenta maiores valores nos Vertissolos. No mapa observa-se que ocorrem os maiores valores nos Vertissolos seguido dos Neossolos Regolíticos, Luvissolos e os Neossolos Flúvicos nas áreas de drenagem. Silva et al. (2019) caracterizando os Planossolos no Agreste, observaram valores nas camadas superficiais para a argila de 15,4 g kg⁻¹; valores superiores aos obtidos por este trabalho.

Na Figura 2b, da geospacialização dos dados de CO no Estado, pode-se observar que 27.681,26 km² da área representando 49,02% do total entre 0,5 a 1,0 g kg⁻¹. Pela Tabela 4 verifica-se que os maiores valores médios estão representados pelos Argissolos Acinzentados seguido pelos Nesossolos Flúvicos e pelos Argissolos Vermelhos. No entanto, os Luvissolos apresentam maiores valores individuais distribuídos espacialmente na região semiárida do Estado.

Avaliando os Neossolos Litólicos, Regolíticos e Quartzarênicos no Cariri paraibano, Silva (2018) e Alves (2019) obtiveram uma média de Carbono Orgânico de 43,85; 33,26; e 32,67 g kg⁻¹ respectivamente. Santos et al. (2019), avaliando os teores e estoques de carbono orgânico do solo no Planalto Sul de Santa Catarina, observaram que, os maiores teores de CO foram encontrados nas camadas mais superficiais do solo em todos os tipos de uso, diminuindo em profundidade.

Na distribuição espacial da SB (Figura 2c), observa-se que 27.090,28 km² da área representam 47,98% do total entre 60 a 80%. Conforme a Tabela 3 dos dados dos parâmetros pode-se verificar que quanto ao SB o Vertissolos e o Cambissolos apresentam os maiores valores médios de 97,75 e 81,5%, respectivamente, com os menores valores para os Latossolos Amarelos de 3%. Pôrto et al. (2009), para o Latossolo Amarelo distrófico localizado em área plana sob mata nativa, obtiveram valores de SB de 1,67%. Resultado com valores menores em comparação a este trabalho.

Na Figura 2d, representando a geospacialização dos dados de DS no Estado, pode-se observar que 26.711,1 km² da área representando 47,30% do total entre 2,0 a 2,3 g cm⁻³. Na Tabela 3 pode-se observar que os Vertissolos e Planossolos apresentam os maiores valores de DS de 2,28 e 2,25 g cm⁻³; e os menores valores de DS ocorrem nos Latossolos Amarelos com 1,32 g cm⁻³.

Barros et al. (2013), avaliando a densidade do solo em área de mata no município de Capim, sob Argissolo Acinzentado Distrófico, obtiveram valores de densidade de 1,41 g cm⁻³. Os autores afirmam que, os menores valores de DS na camada superficial do solo são decorrentes do maior aporte de matéria orgânica nesta camada quando comparada com a camada subsuperficial.

Batista (2017), avaliando a densidade do Neossolo Regolítico submetido a diferentes formas de uso, obtiveram soma de $46,06 \text{ g cm}^{-3}$ na profundidade até 30 cm. Silva et al. (2019), obtiveram uma DS variando de $1,28$ a $1,47 \text{ g cm}^{-3}$; e o Carbono entre 60 g kg^{-1} ; e SB de 2,84%.

Silva et al. (2015), avaliando indicadores dos solos de Argissolos Vermelho-Amarelo e Neossolos Regolíticos no Agreste, obtiveram valores de DS variando entre $0,4$ a $2,8 \text{ g cm}^{-3}$. Para a SB observaram valores de 38 a 100%. Reinert et al. (2008) afirmam que, em densidades acima de $1,75 \text{ g cm}^{-3}$, já ocorrem restrições ao crescimento radicular.

No mapa de EC-Estoque de Carbono do solo (Figura 3), pode-se observar que 36,95% da área comprehende $20.864,11 \text{ km}^2$ entre 25 a 50 Mg ha^{-1} , seguida da classificação entre 0 a 25 Mg ha^{-1} com $14.477,84 \text{ km}^2$ (25,64%) e pela de 50 a 75 Mg ha^{-1} distribuída em 20,20% ($11.406,13 \text{ km}^2$). Na Tabela 4 verifica-se que, os maiores valores médios estão representados pelos Argissolos Acinzentados seguida pelos Neossolos Flúvicos e Argissolos Vermelhos. Os menores valores médios de EC são observados nos Gleissolos, Espodossolos e Plintossolos, respectivamente.

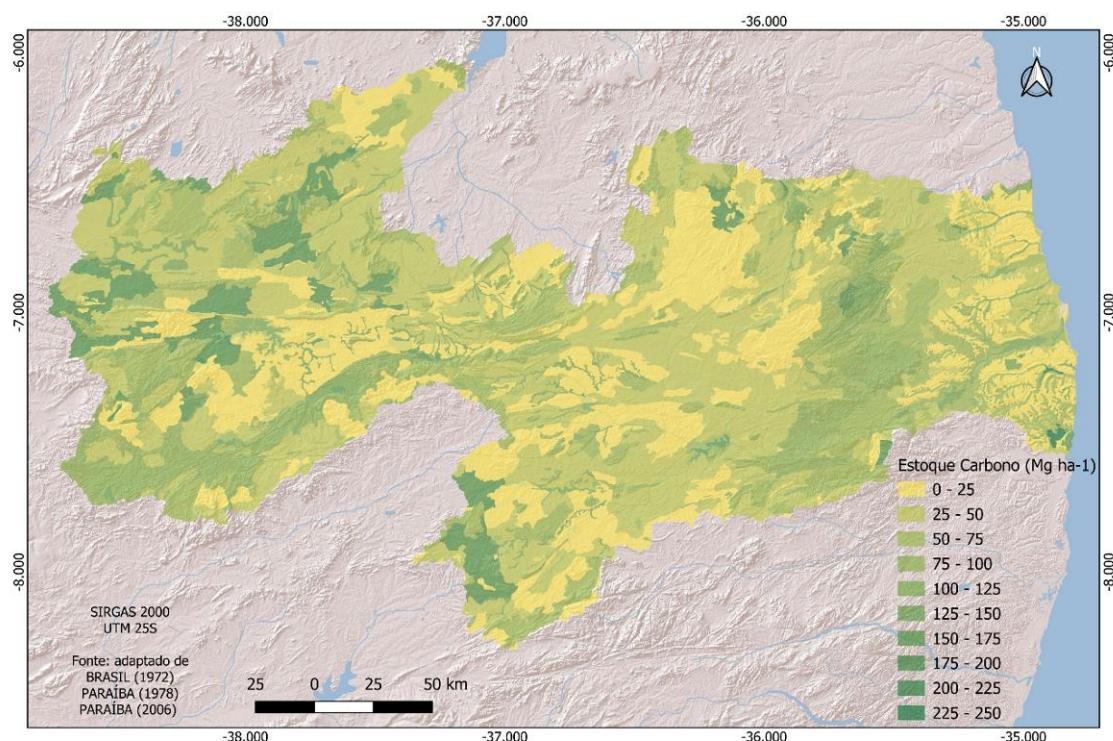


Figura 3 - Estoque de Carbono do solo (Mg ha^{-1}).

Fonte: adaptado de BRASIL (1972); PARAÍBA (1978; 2006); IBGE (2021); ESRI (2023).

Valores máximos observados por este trabalho é de $237,18 \text{ Mg ha}^{-1}$ sob os Gleissolos localizados na região do litoral do Estado. Vasquez et al. (2021), estimando o estoque de carbono para os solos brasileiro obteve valores máximos de $246,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ para a profundidade de 30 cm.

A média observada para os solos estudados por este trabalho é de 63,20 Mg ha⁻¹. Boschi et al. (2015) obtiveram para os solos brasileiros, valor médio de 62,04 Mg ha⁻¹ para o estoque de carbono calculado pela densidade observada, já para a densidade estimada obteve valores médio de 63,97 Mg ha⁻¹. Estes valores são devido que a composição do banco de dados é composta por solos representativos de diversos biomas.

Em Argissolos Acinzentados, Chaves e Farias (2008) avaliando os Tabuleiros Costeiros obtiveram para o EC valores máximos de 112,5 Mg ha⁻¹ para 30 cm de profundidade. Resultado menor quando comparado aos solos utilizados neste estudo, isto devido a área ter sido utilizada somente com o cultivo de cana de açúcar, ocorrendo a diminuição do estoque de carbono armazenado ao longo do tempo.

Souza (2012), avaliando o estoque de carbono em área de Caatinga Secundária Inicial sob Luvissolos em 20 cm de profundidade no município de Várzea, obteve valor médio de 33,78 Mg ha⁻¹. Por este trabalho, o valor para os Luvissolos nesta localidade é de 37,58 Mg ha⁻¹, portanto valor próximo ao da pesquisa.

Santos (2018), em estudo na região do Brejo avaliando o estoque de carbono por via direta para o Latossolo Amarelo Distrófico húmico, Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico úmbrico endoáquico, Planossolo Háplico Eutrófico típico e Gleissolo Melânico Tb Distrófico úmbrico, obteve proporcionalmente para a profundidade de 30 cm, 70,67; 33,04; 38,71; 36,74 Mg ha⁻¹. Resultado similar a este estudo estimado por pedotransferência de 81,18; 45,37; 46,59; 20,50 Mg ha⁻¹, respectivamente.

Em solos sob vegetação nativa o revolvimento do solo é mínimo, preservando assim o estoque total de carbono no solo. Deste modo, o estoque de carbono florestal é superior às áreas cultivadas, nestas áreas o estoque diminui devido a diversos fatores, podem-se destacar a exposição das frações orgânicas ao ataque de microrganismos, o revolvimento e a erosão do solo (NOBRE & GASH, 1997; TOGNON et al., 1998; SILVA, 1997; D'ANDRÉA, 2004; SILVA et al., 1994).

Por este trabalho, os Neossolos Regolíticos apresentam valores médios de 49,74 Mg ha⁻¹, no entanto, Batista (2017) estimando o Estoque de Carbono em um Neossolo Regolítico, obteve valor de 59,64 Mg ha⁻¹. O autor afirma que, os baixos valores da área são resultados de um intenso revolvimento do solo aumentando assim a oxidação dos compostos orgânicos, ruptura dos agregados e exposição da superfície do solo ao impacto das gotas de chuva.

Nesta pesquisa os Latossolos apresentam média de EC de 49,14 Mg ha⁻¹ e os Argissolos Vermelhos Amarelos de 52,59 Mg ha⁻¹. Esses valores são compatíveis com os níveis mundiais da base de dados WISE (BATJES, 1996), estimados em 57,0 Mg ha⁻¹ em Latossolos e 51,0 Mg ha⁻¹ de C armazenado em Argissolos.

Na Tabela 4, da análise estatística descritiva das variáveis, observam-se os valores das variáveis, onde o CO apresenta a maior variabilidade, e a DS a menor variação entre as demais.

Tabela 4 - Dados estatísticos descritivos da modelagem

Produto	Mín.	Média	Máx.	Desv. Pad.	Variabilidade	Q1	Q3	IQR
Saturação de Bases	0	62,67	100	26,18	58	47	76	29
Carbono Orgânico	0	0,86	4	0,59	72	0,4	0,93	0,53
Argila	0	14,43	52	11,51	39	8	18	10
Densidade	0	1,83	2,29	0,46	50	1,67	2,12	0,45
Estoque de Carbono	0	50,37	237,18	37,57	93	20,29	59,03	38,74

No histograma da imagem modelada da AR (Figura 4a) verifica-se que o valor médio (μ) apresenta-se em $14,43 \text{ g kg}^{-1}$ com desvio padrão (σ) de $11,51 \text{ g kg}^{-1}$ demonstrando a variabilidade de 39 g kg^{-1} (Tabela 4). No histograma do SB (Figura 4b) o valor médio (μ) apresenta-se em $62,67\%$ com desvio padrão (σ) de $26,18\%$ demonstrando a variabilidade de 58% .

Na Figura 4c, no histograma do CO, observa-se valor médio (μ) de $0,86 \text{ g kg}^{-1}$ com desvio padrão (σ) de $0,59 \text{ g kg}^{-1}$ e variabilidade de 72 g kg^{-1} . Para a DS (Figura 4d) o histograma demonstra valor médio (μ) de $1,83 \text{ g cm}^{-3}$ com desvio padrão (σ) de $0,46 \text{ g cm}^{-3}$ variabilidade de 50 g cm^{-3} .

O EC (Figura 4e) apresenta no histograma valor médio (μ) de $50,37 \text{ Mg ha}^{-1}$ com desvio padrão (σ) de $37,57 \text{ Mg ha}^{-1}$ e variabilidade de 93 Mg ha^{-1} . Estes resultados refletem na somatória das classes desses fatores em área.

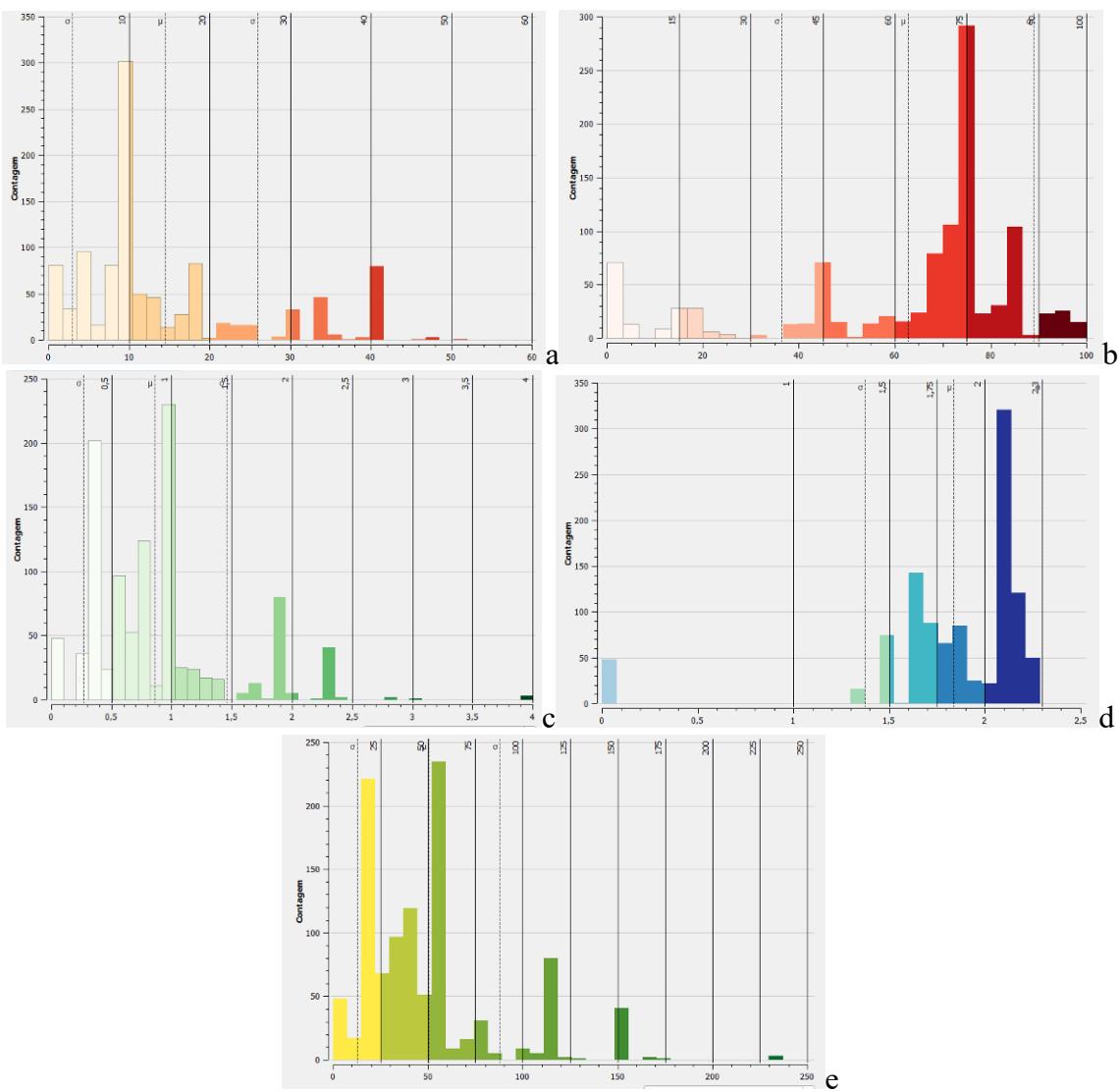


Figura 4 - Histogramas (a) Argila; (b) Saturação por Base; (c) Carbono; (d) Densidade; (e) Estoque de Carbono dos solos.

Conclusão

A utilização das técnicas de geoprocessamento proporcionou resultados com rapidez e precisão.

A estimativa por pedotransferência da densidade dos solos apresentou resultados satisfatórios e compatíveis. A densidade dos solos distribuiu-se em 47,30% da área entre 2,0 a 2,3 g cm⁻³.

Áreas com até 75 Mg ha⁻¹ de Estoque de Carbono totalizaram 82,79% do Estado.

Os valores médios de EC seguiram a ordem dos Gleissolos > Argissolos Acinzentados > Neossolos Flúvicos > Argissolos Amarelos > Vertissolos Ebânicos > Luvissolos Crônicos > Cambissolos Háplicos > Vertissolos Háplicos > Neossolos Litólicos > Argissolos Vermelho Amarelo > Latossolos Amarelos > Planossolos Háplicos > Neossolos Regolíticos > Planossolos Nátricos > Plintossolos > Espodossolos > Neossolos Quartzarênicos > Plintossolos Argilúvicos.

Agradecimentos

À Fapesq e ao CNPq.

Referências Bibliográficas

- ALVES, M. A. B. *Variabilidade espaço-sazonal de atributos químicos, físicos e biológicos em topossequência no cariri paraibano*. 83f. Dissertação (Mestrado). Curso de Ciência do Solo. Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2019.
- BARROS, J. D. DE S.; CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. DE B.; FARIAS, C. H. DE A.; PEREIRA, W. E. Estoque de carbono e nitrogênio em sistemas de manejo do solo, nos Tabuleiros Costeiros paraibanos. *Revista Caatinga*, v.26, n.1, p.35-42, 2013.
- BATISTA, M. C. *Estoque de carbono e frações da matéria orgânica em áreas sob sistemas agroflorestais e agricultura no agreste paraibano*. 41f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia). Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2017.
- BATJES, N. H. Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules. *Geoderma*, v.71, p.31-52, 1996.
- BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey report in Brazil. *Geoderma*, v.139, p.90-97, 2007.
- BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C. C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, v.62, n.3, p.743-749, 1998.
- BERNOUX, M.; CARVALHO, M. D. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brazil's soil carbon stocks. *Soil Science Society of America Journal*, v.66, n.3, p.888-896, 2002.
- BOSCHI, R. S.; LOPES-ASSAD, M. L. R. C.; SOUZA, G. P. DA S.; CIDIN, A. C. M.; ASSAD, E. D. Efeito de estimativa de densidade do solo no cálculo de estoque de carbono. *Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente*, v.2, n.1, p.8-16, 2015.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. *Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba*. Rio de Janeiro. Convênio MA/CONTA/USAID/BRASIL, 1972. (Boletins DPFS-EPE-MA, 15 - Pedologia, 8).
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of American Journal*, v.58, p.1501-1511, 1994.
- CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. DE A. Variabilidade espacial do estoque de carbono nos Tabuleiros Costeiros da Paraíba: Solo cultivado com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.3, n.1, p.20-25, 2008.

D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; GUILHERME, L. R. G. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.39, n.2, p.179-186, 2004.

DE VOS, B.; VAN MEIRVENNE, M.; QUATAERT, P.; DECKERS, J.; MUYS, B. Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.69, n.2, p.500-510, 2005.

ELLERT B. H.; BETTANY, JR. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, v.75, p.529-538, 1995.

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).

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. SANTOS et al. 5^a. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 359p.

ESRI. *Mapa Topográfico Mundial*. Disponível em: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=30e5fe3149c34df1ba922e6f5bbf808f>. Acesso em: novembro de 2022.

FIDALGO, E. C. C.; BENITES, V. DE M.; MACHADO, P. L. O. DE A.; MADARI, B. E.; COELHO, M. R.; MOURA, I. B. DE; LIMA, C. X. DE. *Estoque de carbono nos solos do Brasil*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento/Embrapa Solos, n.º 121).

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.

HAN, G. Z.; ZHANG, G. L.; GONG, Z. T.; WANG, G. F. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density in China. *Soil Science*, v.177, n.3, p.158-164, 2012.

HONG, S. Y.; MINASNY, B.; HAN, K. H.; KIM, Y.; LEE, K. Predicting and mapping soil available water capacity in Korea. *PeerJ*, n.71, p.1-31, 2013.

HOWARD, P. J. A.; LOVELAND, P. J.; BRADLEY, R. I.; DRY, F. T.; HOWARD, D. M.; HOWARD, D. C. The carbon content of soil and its geographical distribution in Great Britain. *Soil Use and Management*, v.11, n.1, p.9-15, 1995.

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.

MANRIQUE, L. A; JONES, C. A. Bulk-density of soils in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal*, v.55, n.2, p.476-481, 1991.

NOBRE, C. A.; GASH, J. Desmatamento muda clima da Amazônia. *Ciência Hoje*, v.22, n.128, p.33-42, 1997.

ONU. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: reference manual*. 3 v. Paris: IPCC. UNEP. OECD. IEA, 1997. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/revised-1996-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>. Acesso em: 21 de abril de 2023.

PARAÍBA. Governo do Estado. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. CEPA-PB. *Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba*. Relatório ZAP-B-D-2146/1. UFPB-EletroConsult 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, 2006. 112p.

PÔRTO, M. L.; ALVES, J. DO C.; DINIZ, A. A.; SOUZA, A. P. DE; SANTOS, D. Indicadores biológicos de qualidade do solo em diferentes sistemas de uso no brejo paraibano. *Ciência Agrotec.*, v.33, n.4, p.1011-1017, 2009.

QGIS. Development Team. 2022. *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>.

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

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. de A. *Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica*. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002.

SANTOS, K. R. F. DOS; BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; WERNER, R. DE S.; WOLSCHICK, N. H.; MOTA, J. M. Teores e estoques de carbono orgânico do solo em diferentes usos da terra no Planalto Sul de Santa Catarina. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v.18, n.2, p.222-229, 2019.

SANTOS, R. X. DOS. *Caracterização macromorfológica dos horizontes superficiais e estimativa do estoque de carbono numa topossequência de solos em Areia na Paraíba*. 27f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia). Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2018.

SCHOLES, M. C.; POWLSON, D.; TIAN, G.; Input control of organic matter dynamics. *Geoderma*, v.79, n.1/4, p.25-47, 1997.

SILVA, A. J. DA; SILVA, P. L. F. DA; FIGUEIRÊDO NETO, N. G. DE; BOTELHO, I. G. DOS S.; GONÇALVES, J. P. F. DOS S.; OLIVEIRA, F. P. DE. Caracterização física e química de Planossolo no Agreste paraibano. In: *Semana de Agronomia*, 15, 2019, Areia. Anais...Areia, 2019.

SILVA, C. A. *Mineralização do nitrogênio e enxofre e caracterização de substâncias húmicas em solos brasileiros por ¹³C-RMN e cromatografia por exclusão de tamanho*. 82f. Tese (Doutorado em Nutrição de Plantas). Universidade de Lavras. Lavras, 1997.

SILVA, G. F. DA; SANTOS, D.; SILVA, A. P. DA; SOUZA, J. M. DE. Indicadores de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso na mesorregião do Agreste Paraibano. *Revista Caatinga*, v.28, n.3, p.25-35, 2015.

SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; SILVA, E. F. Manejo de resíduos e matéria orgânica do solo em plantações de eucalipto: uma questão estratégia para a manutenção da sustentabilidade. *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Boletim Informativo*, v.29, n.3, p.10-20, 2004.

SILVA, J. E.; LEMANSKI, J.; RESCK, D. V. S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca de catiônica em solos da região de Cerrados do oeste baiano. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.18, n.3, p.541-547, 1994.

SILVA, S. Y. A. M. DA. *Regime hídrico e regime térmico de Neossolos do Cariri paraibano*. 85f. Dissertação (Mestrado). Curso de Ciência do Solo. Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2018.

SOUZA, B. V. DE. *Estoque de carbono em diferentes fisionomias de Caatinga do Seridó da Paraíba*. 53f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Centro de Saúde e Tecnologia Rural. Universidade Federal de Campina Grande. Patos, 2012.

TOGNON, A. A.; DEMATTÊ, J. L. E.; DEMATTÊ, J. A. M. Teor e distribuição de matéria orgânica em latossolos das regiões da floresta amazônica e dos cerrados do Brasil central. *Scientia Agrícola*, v.55, n.3, p.343-354, 1998.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Science*, v.163, n.3, p.190-202, 1998.

KAUR, R.; KUMAR, S.; GURUNG, H. P. A pedotransfer function soil data and its comparison with existing PTFs. *Australian Journal of Soil Research*, v.40, n.5, p.847-857, 2002.

VASQUES, G. M.; COELHO, M. R.; DART, R. O.; CINTRA, L. C.; BACA, J. F. M.; SANTOS, M. DE L. M. *Soil organic carbon stock maps for Brazil at 0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm depth intervals with 90 m spatial resolution*. Technical Report. Version 2021. Disponível em: <http://geoinfo.cnps.embrapa.br/documents/3275/download>. Acesso em: 24 de abril de 2023.

VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. *Soil Science Society of America Journal*, v.58, p.175-180, 1994.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, v.37, n.1, p.29-38, 1934.