ISBN: 978-65-87226-04-0

GOVERNO DO ESTADO DO MARANHÃO
SECRETARIA DE ESTADO DE PROGRAMAS ESTRATÉGICOS – SEPE
INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONOMICOS E CARTOGRÁFICOS-IMESC
ZONEAMENTO ECOLÓGICO ECONÔMICO DO BIOMA AMAZÔNICO (MA)

RELATÓRIO TÉCNICO DE MODELOS MATEMÁTICOS COMPLEXOS (GEOMETRIA FRACTAL, MULTIFRACTAL E GEOESTATÍSTICA) APLICADA AO ESTUDO DE ATRIBUTOS DO SOLO DO ZONEAMENTO ECOLÓGICO ECONÔMICO DO ESTADO DO MARANHÃO (ZEE)

ETAPA BIOMA AMAZÔNICO DO MARANHÃO

INSTITUIÇÕES:

IMESC INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS
SEPE SECRETARIA DE ESTADO DE PROGRAMAS ESTRATÉGICOS
GOVERNO DO MARANHÃO GOVERNO DE TODOS NÓS
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
FAPEAD FUNDAÇÃO DE APOIO AO ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO
CPRM Serviço Geológico do Brasil
Embrapa
UFMA Universidade Federal do Maranhão

SÃO LUÍS - MA
2019

GOVERNADOR DO ESTADO DO MARANHÃO
Flávio Dino de Castro e Costa

VICE GOVERNADOR DO ESTADO DO MARANHÃO
Carlos Orleans Brandão Júnior

SECRETÁRIO DE ESTADO DE PROGRAMAS ESTRATÉGICOS
Luis Fernando Silva

PRESIDENTE DO INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS E COORDENADOR GERAL DO ZEE-MA
Dionatan Silva Carvalho

DIRETOR DE ESTUDOS AMBIENTAIS E CARTOGRÁFICOS
Josiel Ribeiro Ferreira

DIRETOR DE ESTUDOS E PESQUISAS
Hiroshi Matsumoto

PEQUISADOR SENIOR DO ZEE-MA
Luiz Jorge Bezerra da Silva Dias

COORDENADOR EXECUTIVO DO ZEE-MA (UEMA)
Paulo Henrique de Aragão Catunda

COORDENADOR DE MODELOS MATEMÁTICOS COMPLEXOS
Glécio Machado Siqueira

EQUIPE TÉCNICA DE MODELOS MATEMÁTICOS COMPLEXOS
Victor Lamarão de França

EQUIPE DE APOIO TÉCNICO – ZEE
Anny Karolyny Oliveira Portela
Allana Pereira Costa
Florise Pereira Reis
Jéssica Suyane Sousa

NORMALIZAÇÃO
Dyana Pereira

REVISÃO
Gustavo Sampaio
Marília de Carvalho Cerveira

DIAGRAMAÇÃO/CAPA
Matheus Pinheiro Soeiro

UNIVERSIDADES ESTADUAL DO MARANHÃO
Gustavo Pereira da Costa-Reitor
Walter Canales Sant'ana-Vice-Reitor
Zafira da Silva de Almeida-Pró-Reitora de Graduação – PROG
Rita de Maria Seabra Nogueira-Pró- -Reitora de Pesquisa e Pós-Graduação – PPG
Paulo Henrique Aragão Catunda-Pró- -Reitor de Extensão e Assuntos Estudantis – PROEXAE
José Rômulo Travassos da Silva-Pró- -Reitor de Gestão de Pessoas – PROGEP
Antônio Roberto Coelho Serra-Pró- -Reitor de Planejamento e Administração – PROPLA

Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos-IMESC

Relatório Técnico de Modelos Matemáticos complexos (Geometria Fractal, Multifractal e Geoestatística) aplicada ao estudo de atributos do Solo do Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Maranhão (ZEE) - Etapa Bioma Amazônico. Glécio Machado Siqueira; Paulo Henrique de Aragão Catunda; Luiz Jorge Bezerra da Silva Dias (coordenadores). São Luís: IMESC, 2019.

ISBN 978-65-87226-04-0

51 p.

1. Solos 2. Estatística 3. Zoneamento Econômico 4. Maranhão I. Título

CDU 631.42/.47

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1 - Mapa contendo os pontos de dados do sistema global de informação do solo, SoilGrid250m 11

Figura 2 - Mapa de variabilidade espacial da altimetria na Região da Amazônia Maranhense 13

Figura 3 - Histogramas de distribuição de frequência para o conteúdo de carbono orgânico no solo na Amazônia Maranhense nas camadas de 0.0-0.05m, 0.05-0.15m, 0.15-0.30m, 0.3-0.6m, 0.6-0.1.0m, 1.0-2.0m e > 2.0m de profundidade 20

Figura 4 - Semivariogramas ajustados para o conteúdo de carbono orgânico no solo da Amazônia Maranhense nas camadas de 0.0-0.05m, 0.05-0.15m, 0.15-0.30m, 0.3-0.6m, 0.6-0.1.0m, 1.0-2.0m e > 2.0m de profundidade 22

Figura 5 - Semivariograma escalonado para o conteúdo de carbono orgânico no solo na Amazônia Maranhense nas camadas de 0.0-0.05m, 0.05-0.15m, 0.15-0.30m, 0.3-0.6m, 0.6-0.1.0m, 1.0-2.0m e > 2.0m de profundidade .. 23

Figura 6 - Mapa de variabilidade espacial da matéria orgânica do solo na Amazônia Maranhense na camada de 0.0-0.05m de profundidade 25

Figura 7 - Mapa de variabilidade espacial da matéria orgânica do solo na Amazônia Maranhense na camada de 0.05-0.15m de profundidade 26

Figura 8 - Mapa de variabilidade espacial da matéria orgânica do solo na Amazônia Maranhense na camada de 0.15-0.30m de profundidade 27

Figura 9 - Mapa de variabilidade espacial da matéria orgânica do solo na Amazônia Maranhense na camada de 0.3-0.6m de profundidade 28

Figura 10 - Mapa de variabilidade espacial da matéria orgânica do solo na Amazônia Maranhense na camada de 0.6-1.0m de profundidade 29

Figura 11 - Mapa de variabilidade espacial da matéria orgânica do solo na Amazônia Maranhense na camada de 1.0-2.0m de profundidade 30

Figura 12 - Mapa de variabilidade espacial da matéria orgânica do solo na Amazônia Maranhense na camada > 2.0m de profundidade 31

CAPÍTULO 2

Figura 1 - Dimensão generalizada para os atributos químicos na área de estudo. A. 0-0,2 m e B. 0,2-0,4 m 44

Figura 2 - Espectro de singularidade para os atributos químicos na área de estudo. A. 0-0,2 m e B. 0,2-0,4 m 45

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	3
2	**OBJETIVOS**	5
2.1	**Objetivo geral**	5
2.2	**Objetivos específicos**	5
	CAPÍTULO 1: DINÂMICA ESPACIAL DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO NA AMAZÔNIA MARANHENSE: ANÁLISE ESTATÍSTICA E GEOESTATÍSTICA DE DADOS	6
1	**INTRODUÇÃO**	7
2	**OBJETIVOS**	10
2.1	**Objetivo geral**	10
2.2	**Objetivo específicos**	10
3	**MATERIAL E MÉTODOS**	11
3.1	**Conteúdo de Carbono Orgânico**	11
3.2	**Modelagem do Relevo**	12
3.3	**Análise Estatística**	14
3.4	**Análise Geoestatística**	14
4	**RESULTADOS E DISCUSSÃO**	16
5	**CONSIDERAÇÕES FINAIS**	32
	CAPÍTULO 2: ANÁLISE MULTIFRACTAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM ESCALA DE PARCELA	34
1	**INTRODUÇÃO**	35
2	**OBJETIVOS**	36
3	**MATERIAL E MÉTODOS**	37
3.1	**Descrição da área experimental**	37
3.2	**Amostragem**	37
3.3	**Estatística descritiva e análise multifractal**	38
4	**RESULTADO E DISCUSSÃO**	40
5	**CONSIDERAÇÕES FINAIS**	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A Tabela 1 apresenta a lista de municípios presentes na área de domínio do Bioma Amazônico no Estado do Maranhão. São 112 municípios, incluindo São Luís a terceira maior cidade da Região Amazônica e Imperatriz a terceira maior cidade do interior da Amazônia. De acordo com o Macro Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Maranhão as frentes de ocupação do Estado durante o processo de colonização ocorreram seguindo três distintas frentes: a) Frente litorânea: cujo processo de colonização se iniciou pela cidade de São Luís, expandindo-se para o litoral norte em direção a Pinheiro e para o interior partindo para Zé Doca e Bacabal; b) Frente da Pecuária: ocorrendo principalmente nas cidades de Zé Doca, Santa Inês, Santa Luzia e Bacabal, na região central da Amazônia Maranhense e ao sul, partindo de Imperatriz; c) Frente dos Migrantes da Seca: partindo principalmente de Imperatriz e Grajaú ao centro da Região da Amazônia Maranhense.

Tabela 1 - Lista de Municípios da Amazônia Maranhense

LISTA DE MUNICÍPIOS - AMAZÔNIA MARANHENSE							
1	AÇAILÂNDIA	**29**	CÂNDIDO MENDES	**57**	MARACAÇUMÉ	**85**	ROSÁRIO
2	ALCÂNTARA	**30**	CANTANHEDE	**58**	MARAJÁ DO SENA	**86**	SANTA HELENA
3	ALTAMIRA DO MARANHÃO	**31**	CARUTAPERA	**59**	MARANHÃOZINHO	**87**	SANTA INÊS
4	ALTO ALEGRE DO PINDARÉ	**32**	CEDRAL	**60**	MATINHA	**88**	SANTA LUZIA
5	AMAPÁ DO MARANHÃO	**33**	CENTRAL DO MARANHÃO	**61**	MATÕES DO NORTE	**89**	SANTA LUZIA DO PARUÁ
6	AMARANTE DO MARANHÃO	**34**	CENTRO DO GUILHERME	**62**	MIRANDA DO NORTE	**90**	SANTA RITA
7	ANAJATUBA	**35**	CENTRO NOVO DO MARANHÃO	**63**	MIRINZAL	**91**	SANTO AMARO DO MARANHÃO
8	APICUM-AÇU	**36**	CIDELÂNDIA	**64**	MONÇÃO	**92**	SÃO BENTO
9	ARAGUANÃ	**37**	CONCEIÇÃO DO LAGO-AÇU	**65**	MORROS	**93**	SÃO FRANCISCO DO BREJÃO
10	ARAME	**38**	CURURUPU	**66**	NOVA OLINDA DO MARANHÃO	**94**	SÃO JOÃO BATISTA
11	ARARI	**39**	GODOFREDO VIANA	**67**	OLHO D'ÁGUA DAS CUNHÃS	**95**	SÃO JOÃO DO CARÚ
12	AXIXÁ	**40**	GOVERNADOR NEWTON BELLO	**68**	OLINDA NOVA DO MARANHÃO	**96**	SÃO JOSÉ DE RIBAMAR
13	BACABAL	**41**	GOVERNADOR NUNES FREIRE	**69**	PAÇO DO LUMIAR	**97**	SÃO LUÍS
14	BACABEIRA	**42**	GRAJAÚ	**70**	PALMEIRÂNDIA	**98**	SÃO LUÍS GONZAGA DO MARANHÃO
15	BACURI	**43**	GUIMARÃES	**71**	PAULO RAMOS	**99**	SÃO MATEUS DO MARANHÃO
16	BACURITUBA	**44**	HUMBERTO DE CAMPOS	**72**	PEDRO DO ROSÁRIO	**100**	SÃO PEDRO DA ÁGUA BRANCA
17	BELA VISTA DO MARANHÃO	**45**	ICATU	**73**	PENALVA	**101**	SÃO VICENTE FERRER
18	BEQUIMÃO	**46**	IGARAPÉ DO MEIO	**74**	PERI MIRIM	**102**	SATUBINHA
19	BOA VISTA DO GURUPI	**47**	IMPERATRIZ	**75**	PINDARÉ-MIRIM	**103**	SENADOR LA ROCQUE
20	BOM JARDIM	**48**	ITAIPAVA DO GRAJAÚ	**76**	PINHEIRO	**104**	SERRANO DO MARANHÃO
21	BOM JESUS DAS SELVAS	**49**	ITAPECURU MIRIM	**77**	PIO XII	**105**	TUFILÂNDIA
22	BOM LUGAR	**50**	ITINGA DO MARANHÃO	**78**	PORTO RICO DO MARANHÃO	**106**	TURIAÇU
23	BREJO DE AREIA	**51**	JOÃO LISBOA	**79**	PRESIDENTE JUSCELINO	**107**	TURILÂNDIA
24	BURITICUPU	**52**	JUNCO DO MARANHÃO	**80**	PRESIDENTE MÉDICI	**108**	VIANA
25	BURITIRANA	**53**	LAGO DA PEDRA	**81**	PRESIDENTE SARNEY	**109**	VILA NOVA DOS MARTÍRIOS
26	CACHOEIRA GRANDE	**54**	LAGO DO JUNCO	**82**	PRESIDENTE VARGAS	**110**	VITÓRIA DO MEARIM
27	CAJAPIÓ	**55**	LAGO VERDE	**83**	PRIMEIRA CRUZ	**111**	VITORINO FREIRE
28	CAJARI	**56**	LUÍS DOMINGUES	**84**	RAPOSA	**112**	ZÉ DOCA

Fonte: Elaboração Própria (2019).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a variabilidade de escala de atributos do solo no Bioma Amazônico por meio de modelos matemáticos complexos: geoestatística, geometria fractal e análise multifractal.

2.2 Objetivos específicos

a) O objetivo geral deste trabalho é avaliar a variabilidade espacial da dinâmica do conteúdo de carbono orgânico do solo nos municípios da Amazônia Maranhense (Brasil).
b) O objetivo deste trabalho foi avaliar a multifractalidade de atributos químicos nas camadas de 0-0,2 e 0,2-0,4m de um Latossolo Vermelho em escala de parcela no Bioma Amazônico Maranhense.
c) Apresentar lista de espécies de formigas da Amazônia Maranhense e biomas adjacentes, e indicar lacunas de amostragem biológica para o Estado do Maranhão.

1.

DINÂMICA ESPACIAL DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO NA AMAZÔNIA MARANHENSE: ANÁLISE ESTATÍSTICA E GEOESTATÍSTICA DE DADOS

1 INTRODUÇÃO

A taxa média de crescimento da população mundial é 1,2 % ao ano, atingindo mais de 7,3 bilhões de habitantes em 2015 e estima-se que até 2100 este número passará para mais de 11,2 bilhões de habitantes (UNITED NATIONS, 2015). O Estado do Maranhão (Brasil) de acordo com o censo do IBGE de 2010 apresentava uma população de 6.574.789 de habitantes e uma estimativa que este número chegou a 7.000.229 de habitantes em 2017 (IBGE, 2018), ocorrendo um aumento populacional da ordem de 6,47% ao ano segundo as estimativas.

O aumento populacional atua diretamente sobre a dinâmica do uso e cobertura da terra (PARIZZI, 2017), uma vez que impacta diretamente os sistemas naturais, devido ao aumento na demanda por bens de consumo, materiais e energia. De acordo com o IBGE (2018) o Estado do Maranhão é o décimo Estado mais populoso do país. Tal fato é de suma importância para o entendimento das alterações sobre o uso e cobertura da terra, principalmente na região da Amazônia Maranhense, uma vez que pouco se sabe sobre a dinâmica do carbono orgânico nessa região, cujo aumento demográfico exerce uma enorme pressão sobre os recursos naturais da região, e com isso, surge a necessidade do estudo e entendimento de técnicas de manejo sustentável do solo nestas áreas.

De acordo com Adami et al. (2012) a sequência das mudanças mais comumente encontradas na Amazônia é a floresta sendo convertida em pastagem e depois em agricultura, além do aumento das áreas urbanas, industriais e serviços logísticos, que possuem elevado potencial de degradação ambiental. Por outro lado, vale ressaltar que no Estado do Maranhão existe um enorme espectro de comunidades tradicionais que exploram os recursos naturais da Amazônia em diferentes escalas e perspectivas, com baixo nível de tecnologia, cujos impactos não são conhecidos, quando comparados à prática da agricultura e pecuária extensiva que são mais comumente estudados pela academia.

As alterações no uso e cobertura da terra são a segunda maior fonte de emissão de gases de efeito estufa induzida pelo homem, principalmente devido ao desmatamento (DON et al., 2011), perdendo somente para os combustíveis fósseis (VAN DER WERF et al., 2009). De tais mudanças resultam, principalmente, a diminuição da matéria orgânica do solo (MOS), cujo conteúdo varia horizontalmente

e verticalmente ao longo da paisagem. De todo o conteúdo de MOS, cerca de 58% se encontram estocados no solo na forma de carbono orgânico do solo (SOC), havendo um maior conteúdo de SOC nas camadas superficiais diminuindo em profundidade (NELSON; SOMMER, 1996). Dessa maneira, o conhecimento da dinâmica do carbono orgânico do solo (SOC), permite uma compreensão das mudanças climáticas locais, regionais e globais.

Dixon et al. (1994) descrevem que nos ecossistemas florestais cerca de 40% do carbono estão armazenados no solo, representando está em uma quantidade de carbono estocada superior a presente na atmosfera (LAL, 2004). Nesse sentido, as mudanças no uso e cobertura da terra favorecem a diminuição do carbono orgânico no solo (SOC), contribuindo para o depauperamento do solo e dos seus atributos biológicos, físicos e químicos principalmente na camada mais superficial que é justamente a camada onde se encontra o maior estoque de carbono orgânico do solo.

O uso e o manejo adequados do solo proporcionam a elevação do teor de MOS (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), a qual está relacionada com as variáveis climáticas da área (RABBI et al., 2014). Regiões de clima tropical possuem uma taxa de decomposição da MOS mais elevada devido às altas temperaturas e umidade do solo (SIX et al., 2002). Segundo Wiesmeier et al. (2013) a umidade do solo é o principal fator que influencia no armazenamento de SOC e nitrogênio, tanto para áreas com uso de pastagem quanto para áreas agrícolas, porém as áreas de agricultura sofrem menores efeitos climáticos, já que estas podem ser balanceadas com práticas de manejo (WIESMEIER et al., 2013) como a irrigação (LACLAU; LACLAU, 2009). RABBI et al. (2015) observaram que 64% do estoque de C em regiões áridas da Austrália está relacionado com variáveis climáticas, enquanto que somente 1,4% está relacionado com o uso e práticas de manejo. Nesse sentido, o estudo e a compreensão do conteúdo de carbono orgânico do solo na Amazônia Maranhense são de suma importância para o desenvolvimento sustentável da região, vez que o Estado do Maranhão possui elevada variabilidade climática com duas estações bem definidas (seca e chuvosa) e com elevadas temperaturas durante todo o ano, ocasionando maiores perdas de carbono para a atmosfera, e exigindo o uso de técnicas de manejo adequadas as condições de solo e clima da região.

Nesse sentido, um dos maiores desafios para a agricultura no Estado do Maranhão é o desenvolvimento de técnicas conservacionistas de solo e planta, que valorizem o menor revolvimento do solo, envolvendo a adaptação de plantas de cobertura aptas às condições climáticas do Maranhão, principalmente durante a estação seca, permitindo a manutenção de palha e restos vegetais sobre o solo e a ciclagem de matéria orgânica e nutrientes. Nas comunidades tradicionais do Maranhão, é comum o cultivo de pequenas áreas, conhecidas como roça de toco, havendo a abertura de novas áreas continuamente, uma vez que com o passar dos anos as taxas de produtividades diminuem, considerando que não são aplicadas técnicas de manejo adequado e reposição dos nutrientes exportados pelos cultivos. Cabe ao Estado prestar assistência técnica a essas comunidades, com o intuito de manutenção do conhecimento tradicional, preservar a soberania alimentar e desenvolvimento sustentável da região e a manutenção dos estoques de carbono orgânico do solo.

A sequência de mudanças de uso e cobertura da terra exerce influência sobre a quantidade de matéria orgânica do solo. A conversão de floresta primária em pastagem ou em áreas agrícolas provoca a perda de carbono orgânico, porém esta ocorre em maior intensidade quando as florestas primárias são convertidas em áreas agrícolas (MEERSMANS et al., 2009; DON et al, 2011; CHERUBIN et al., 2016).

Assim, se faz necessário o estudo e o conhecimento do conteúdo de carbono orgânico do solo nos municípios da Amazônia Maranhense, visando o desenvolvimento sustentável, a preservação do meio ambiente e a geração de tecnologias de uso e manejo do solo adaptadas às condições de solo e clima da região.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo geral desse trabalho é avaliar a variabilidade espacial da dinâmica do conteúdo de carbono orgânico do solo nos municípios da Amazônia Maranhense (Brasil).

2.2 Específicos

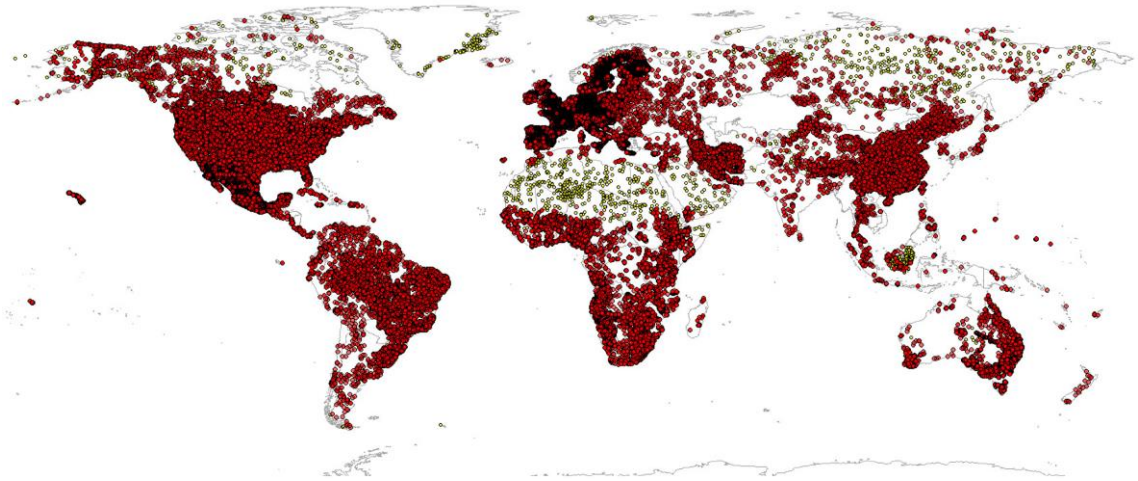
a) Compilar banco de dados específico sobre o conteúdo de carbono orgânico do solo na Amazônia Maranhense a partir do sistema SoilGrids;
b) Utilizar ferramentas de geoestatística para mapear o conteúdo de carbono orgânico do solo na Amazônia Maranhense;
c) Caracteriza a dinâmica espacial do conteúdo de carbono do solo na Amazônia Maranhense.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Conteúdo de Carbono Orgânico

Foram utilizadas informações do conteúdo de carbono orgânico no solo (SOC, g kg^{-1}) obtidos da plataforma de acesso aberto SoilGrids250m (www.soilgrids.org – ISRIC World Soil Information), em que cada ponto avaliado possui representatividade de 6,25ha (250m x 250m) (Figura 1).

Figura 1 - Mapa contendo os pontos de dados do sistema global de informação do solo, SoilGrid250m



Fonte: Hengl et al. (2017)

Os atributos do solo obtidos no SoilGrids250m foram estimados por um modelo de regressão que associa banco de dados internacional contendo 150 mil informações de solo avaliadas em campo, com 158 covariáveis representativas dos fatores de formação do solo, havendo maior ou menor variação dos dados preditos em função da densidade de informações utilizadas na modelagem regional (HENGL et al., 2017).

No Brasil existem 7.842 perfis de solo, correspondendo a uma densidade 0,924 para cada 10.000km^2. No Estado do Maranhão foram consideradas na modelagem do SoilGrids250m aproximadamente 200 observações de campo dos horizontes com representatividade pedológica, sendo que a uniformidade de distribuição dos dados é baixa nas regiões noroeste, centro-oeste e sul do Estado do Maranhão (MENDES, 2015).

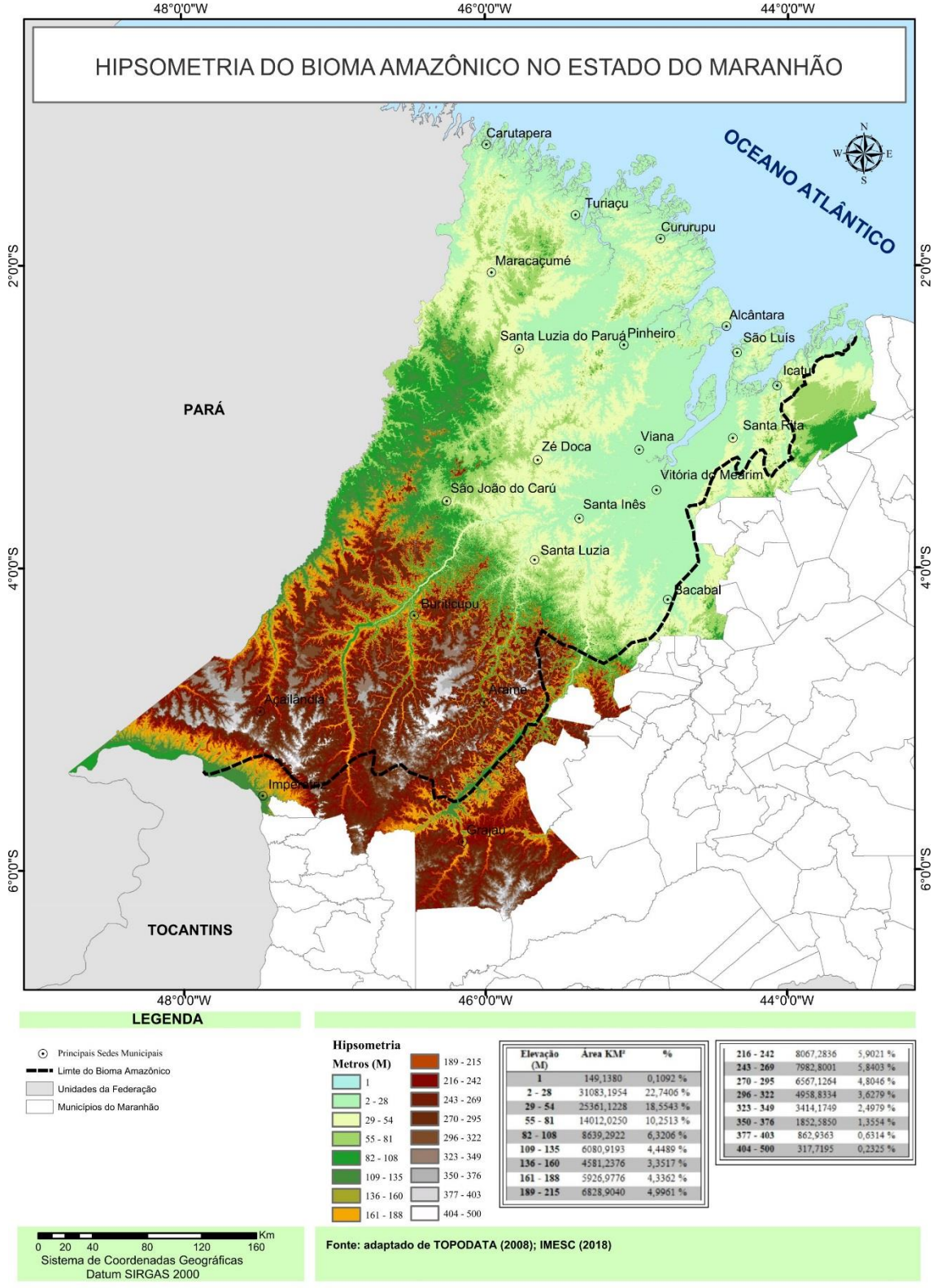
Foram utilizadas as informações das profundidades de 0,0-0,05m, 0,05-0,15m, e 0,15-0,30m, 0,30-0,60m, 0,6-1,0m, 1,0-2,0m e > 2,0m de profundidade. A partir da prospecção das informações (‘data mining’) das 110 mil informações do SoilGrids250m foi construído novo banco de dados utilizando somente informações do Estado do Maranhão. O banco de dados foi composto por 670.742 observações.

3.2 Modelagem do Relevo

A altimetria para a área de estudo é apresentada na Figura 2, cujos dados foram obtidos do sistema SRTMA - Shuttle Radar Topography Mission, projeto entre a NASA (National Aeronautics and Space Administration), NGA (National Geospatial-Intelligence Agency), DLR (Agência Espacial Alemã) e ASI (Agência Espacial Italiana) com o objetivo de gerar um Modelo Digital de Elevação (MDE) da Terra usando a interferometria.

A missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), ocorrida em 2000, possibilitou a coleta de dados altimétricos para praticamente toda a superfície terrestre. Para a geração da altimetria e geração do tema de declividade nas áreas de estudos foi utilizado o arquivo denominado SRTM 28_14 (http://seamless.usgs.gov).

Figura 2 - Mapa de variabilidade espacial da altimetria na Região da Amazônia Maranhense



3.3 Análise Estatística

Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software SAS científica, versão 8.0 (SAS, 1999). Os parâmetros estatísticos descritivos (média, desvio padrão, coeficientes de variação, assimetria, curtose e o teste de Kolmogorov-Smirnov) foram calculados para verificar a dispersão e as medidas de tendência central dos dados.

Histogramas de distribuição de frequência foram construídos com o objetivo de compreender a dispersão dos dados e a presença de valores discrepantes ("*outliers"*).

3.4 Análise Geoestatística

O semivariograma experimental foi utilizado para determinar a variabilidade e a dependência espacial entre as amostras, representando quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado, sendo então expresso por meio da Equação 1:

$$\gamma^{*}(h) = \frac{1}{2\,N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \qquad (1)$$

Em que a semivariância é estimada a partir de $\gamma^{*}(h)$ e $N(h)$ representa o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ separadas por um vetor (h). Desta forma, a dependência espacial manifesta-se como uma correlação entre as amostras que diminui à medida que a distância entre os pontos amostrais aumenta e desaparece completamente quando a distância entre os pontos é suficientemente grande, os quais, neste caso, são considerados estatisticamente independentes (VIEIRA, 2000). Desta maneira, o gráfico do semivariograma é composto por uma série de valores (efeito pepita, variância estrutural e alcance), aos quais é preciso adequar um modelo matemático. O efeito pepita (C_0) indica a descontinuidade entre as amostras, ou seja, a variabilidade espacial não detectada durante o processo de amostragem do solo. A variância estrutural (C_1) apresenta-se como um componente do semivariograma que indica o ponto no qual a correlação entre as amostras se estabiliza. O alcance (a) representa o tamanho das manchas de variabilidade espacial para um determinado atributo, em que a partir deste ponto não existe mais

correlação entre as amostras.

Todos os atributos físicos do solo envolvidos nesse estudo se ajustaram ao modelo esférico. De acordo com a Equação 2, o modelo esférico é descrito inicialmente como linear (aproximadamente 1/3 do alcance – *0<h<a*) e em seguida apresentando uma parte pendente (2/3 do alcance - *h>a*).

$$\gamma(h) = C_0 + C_1\left[\frac{3}{2}\left(\frac{h}{a}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^3\right] \quad 0 < h < a$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad h > a \tag{2}$$

Uma vez ajustado um modelo matemático ao semivariograma, utilizou-se a técnica de krigagem para fazer a interpolação dos dados para os locais não amostrados sem tendência e com variância mínima (VIEIRA, 2000; CARVALHO; ASSAD, 2005; GREGO; VIEIRA, 2005). A utilização da técnica de krigagem (Equação 3) utiliza a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma para estimar valores em qualquer posição dentro do campo (VIEIRA, 2000).

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_1 Z(xi) \tag{3}$$

O software SURFER 11.6 (GOLDEN SOFTWARE, 2013) foi então utilizado para construção de mapas de isolinhas para os diferentes atributos envolvidos nesse estudo, utilizando os valores estimados por meio da técnica de krigagem para os locais não amostrados (VIEIRA; PAZ GONZÁLEZ, 2003).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os parâmetros estatísticos para os dados do conteúdo de carbono orgânico do solo (g kg^{-1}) nas camadas de 0.0-0.05m, 0.05-0.15m, 0.15-0.30m, 0.3-0.6m, 0.6-0.1.0m, 1.0-2.0m e > 2.0m de profundidade para a Região da Amazônia Maranhense.

A camada de 0.0-0.05m de profundidade apresentou os maiores valores de carbono orgânico (214 g kg^{-1}). De acordo com Rosa et al. (2011) a matéria orgânica do solo é, assim, considerada importante indicador da qualidade do solo e bastante sensível às alterações nos sistemas de manejo. Nesse sentido, destaca-se que nessa camada do solo ocorre a fragmentação da matéria orgânica por diferentes organismos e por processos físico-químicos, sendo que esta camada alberga o maior conteúdo de carbono orgânico do solo. Por outro lado, a camada superficial do solo é a primeira a refletir os efeitos das mudanças de cobertura do solo, havendo perdas de carbono para a atmosfera e com consequente aumento da emissão de gases de efeito estufa. O entendimento e compreensão do conteúdo de carbono do solo em profundidade permite descrever alternativas de manejo que possibilitam a conservação do solo e do meio ambiente e o desenvolvimento sustentável.

Verifica-se que as camadas de 0.15-0.30m, 0.3-0.6m e 0.6-0.1.0m apresentaram os maiores valores de carbono orgânico do solo na Amazônia Maranhense respectivamente, 158 g kg^{-1}, 155 g kg^{-1} e 140 g kg^{-1}. Havendo uma diminuição do conteúdo de carbono orgânico em profundidade.

Tabela 2 - Parâmetros estatísticos para os dados do conteúdo de carbono orgânico no solo na Amazônia Maranhense nas camadas de 0.0-0.05m, 0.05-0.15m, 0.15-0.30m, 0.3-0.6m, 0.6-0.1.0m, 1.0-2.0m e > 2.0m de profundidade

	0.0-0.05 m deep	**0.05-0.15 m deep**	**0.15-0.30 m deep**	**0.3-0.6 m deep**	**0.6-1.0 m deep**	**1.0-2.0 m deep**	**>2.0 m deep**
Minimum	0	9	6	2	0	0	0
Maximum	214	128	158	155	140	139	129
Mean	13.70	18.60	15.82	9.94	6.34	4.67	4.41
Variance	120.19	81.38	90.93	98.99	91.33	89.71	89.68
Standard deviation	10.96	9.02	9.54	9.95	9.56	9.47	9.47
Coefficient of variation	80.035	48.503	60.288	100.066	150.639	202.654	214.871
Skew	4.84	4.85	5.31	5.00	5.34	5.42	5.21
Kurtosis	55.70	32.16	41.32	35.02	39.07	40.33	37.11
Kolmogorov-Smirnov stat	0.162Ln	0.273Ln	0.297Ln	0.31Ln	0.315Ln	0.324Ln	0.325Ln

Fonte: Elaboração Própria (2019)

A maior variância dos dados foi encontrada na camada de 0.0-0.05m de profundidade (120.19), tal fato reflete a maior variabilidade dos dados nessa camada, uma vez que ela é a que recebe diretamente o aporte de carbono orgânico ao solo e a primeira camada a perder o carbono para a atmosfera uma vez que, por meio das alterações antrópicas ao ambiente, como o desflorestamento ou o manejo inadequado do solo. Em contrapartida, nas camadas mais profundas foram encontrados os maiores valores de coeficiente de variação (CV, %), tal fato de deve a maior heterogeneidade dos dados nestas camadas, correspondendo a variações de relevo, geomorfologia, geologia e tipo de solo presentes na Amazônia Maranhense ao longo da paisagem. Os valores de variância e coeficiente de variação dos dados são melhores compreendidos quando se realiza uma análise conjunta dos histogramas de distribuição de frequência (Figura 3).

Verifica-se que o histograma de distribuição de frequência para a camada de 0.0-0.05m de profundidade é assimétrico, leptocúrtico, assimétrico positivo, ou seja, os dados estão agrupados próximos à moda e a média, no entanto, a média é superestimada devido a ocorrência de valores maiores de carbono orgânico no solo ao longo da paisagem na área da Amazônia Maranhense. Nesse caso, quando os gráficos do histograma de distribuição de frequência são analisados em conjunto, nota-se que o conteúdo de carbono na camada de 0.0-0.05m de profundidade apresenta comportamento menos assimétrico quando comparado aos demais conjuntos de dados do carbono orgânico em profundidade.

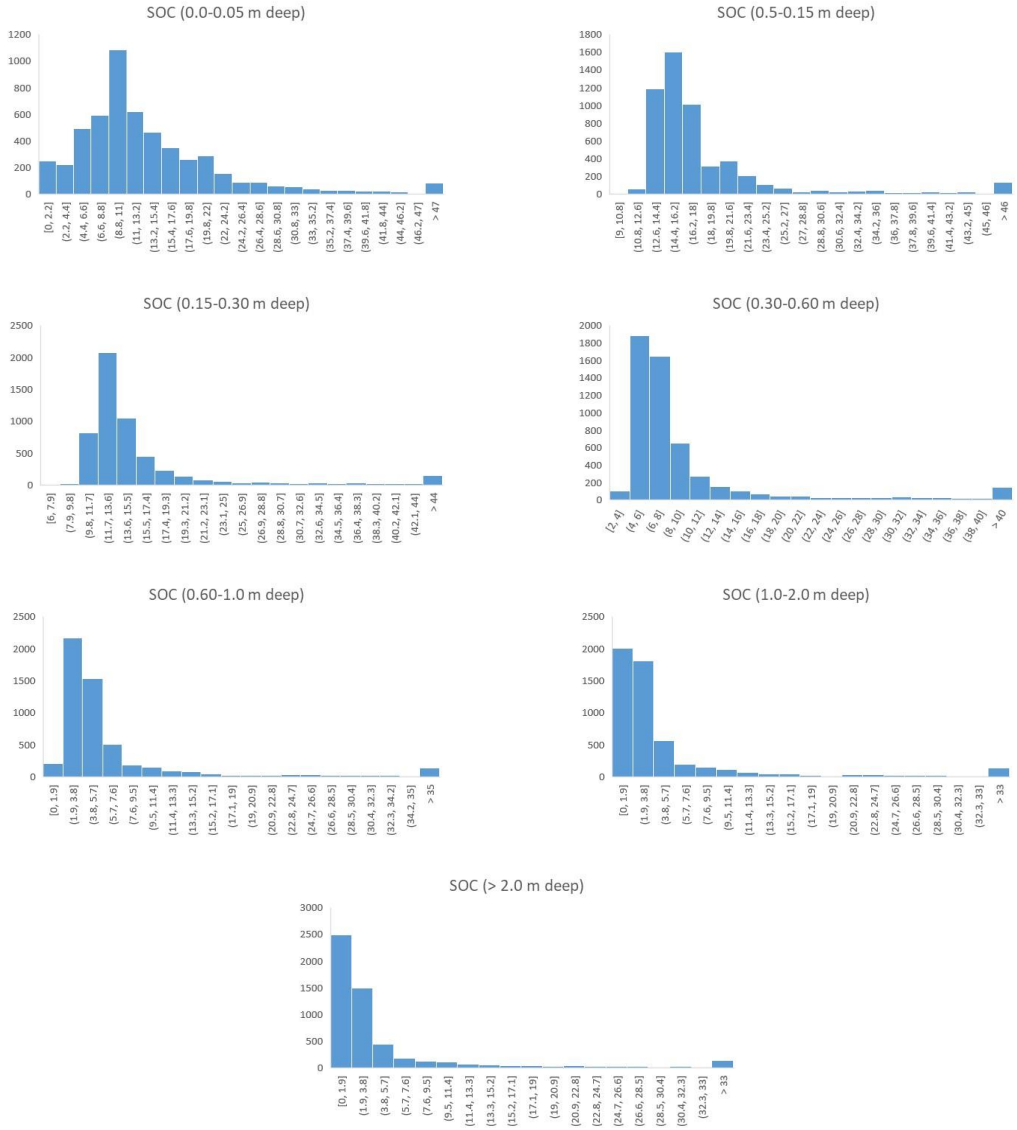
A diminuição do conteúdo de carbono orgânico em profundidade que apresenta maiores valores de coeficiente de variação (Tabela 2) é melhor entendido quando se analisam os seus histogramas de distribuição de frequência (Figura 3), que demonstram que os dados possuem distribuição assimétricas leptocúrticas censuradas, ou seja, a maior parte dos valores são baixos, todavia, com ocorrência de diferentes valores em casses frequência mais elevados, sem ocorrência de valores baixos fora da curva de distribuição.

Os valores de coeficiente de variação (CV, %) conforme classificação de Gomes (2000) são médios para as camadas de 0.05-0.15m (48,50%), 0.0-0.05m (80.03%) e 0.15-0.30m (60.28%) e elevado para as camadas de 0.3-0.6m (100,06%), 0.6-0.1.0m (150.63%), 1.0-2.0m (202.65%) e > 2.0m (214,87%). A presença de valores de coeficiente de variação medianos para as camadas superficiais do solo, se deve a maior estabilidade do conteúdo de carbono nestas

camadas, porém, é sabido que o uso e cobertura da terra quando praticados de maneira inadequada, não respeitando as características naturais dos solos e climáticas de cada região, elevam as perdas de carbono para a atmosfera. Enquanto que o conteúdo de carbono orgânico do solo nas camadas mais profundas é mais variável, considerando a profundidade do solo, e consequentemente o volume de solo explorado pelas raízes e outros organismos, ciclagem de nutrientes e ciclo hidrológico de cada microrregião dentro da área da Amazônia Maranhense.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros de ajuste do semivariograma para o conteúdo de carbono orgânico no solo na Amazônia Maranhense nas camadas de 0.0-0.05m, 0.05-0.15m, 0.15-0.30m, 0.3-0.6m, 0.6-0.1.0m, 1.0-2.0m e > 2.0m de profundidade. O modelo esférico foi ajustado em todos os conjuntos de dados, concordando com outros resultados que indicam que este modelo é o que mais se ajusta aos atributos do solo (TRANGMAR et al., 1985; BERTOLANI; VIEIRA, 2001; SOUZA et al., 2004).

Figura 3 - Histogramas de distribuição de frequência para o conteúdo de carbono orgânico no solo na Amazônia Maranhense nas camadas de 0.0-0.05m, 0.05-0.15m, 0.15-0.30m, 0.3-0.6m, 0.6-0.1.0m, 1.0-2.0m e > 2.0m de profundidade



Fonte: Elaboração Própria (2019)

Ao contrário dos valores de coeficiente de variação (CV, %) que foram mais baixos para as camadas superficiais do solo, os valores de efeito pepita (C_0, Tabela 3) mais baixos são relatados para as camadas mais profundas. No entanto, quando avaliou-se os valores de efeito pepita (C_0) e variância estrutural (C_1) conjuntamente, verificou-se que apenas a camada de 0.0-0.05m de profundidade apresenta um padrão espacial distinto das demais camadas.

Tabela 3 - Parâmetros de ajuste do semivariograma para o conteúdo de carbono orgânico no solo na Amazônia Maranhense nas camadas de 0.0-0.05m, 0.05-0.15m, 0.15-0.30m, 0.3-0.6m, 0.6-0.1.0m, 1.0-2.0m e > 2.0m de profundidade.

	Modelo	C_0	C_1	a (m)	r^2	RSS	GD (%)
SOC (0.0-0.05 m deep)	Spherical	54	48	175000	0.976	61.2	52.94
SOC (0.5-0.15 m deep)	Spherical	28	32	155000	0.933	51.6	46.67
SOC (0.15-0.30 m deep)	Spherical	30	31	130000	0.940	59.3	49.18
SOC (0.30-0.60 m deep)	Spherical	33	34	145000	0.948	60.2	49.25
SOC (0.60-1.0 m deep)	Spherical	28	36	145000	0.950	53.7	43.75
SOC (1.0-2.0 m deep)	Spherical	28	36	148000	0.954	47.7	43.75
SOC (> 2.0 m deep)	Spherical	26	36	145000	0.957	49.1	41.94

Fonte: Elaboração Própria (2019)

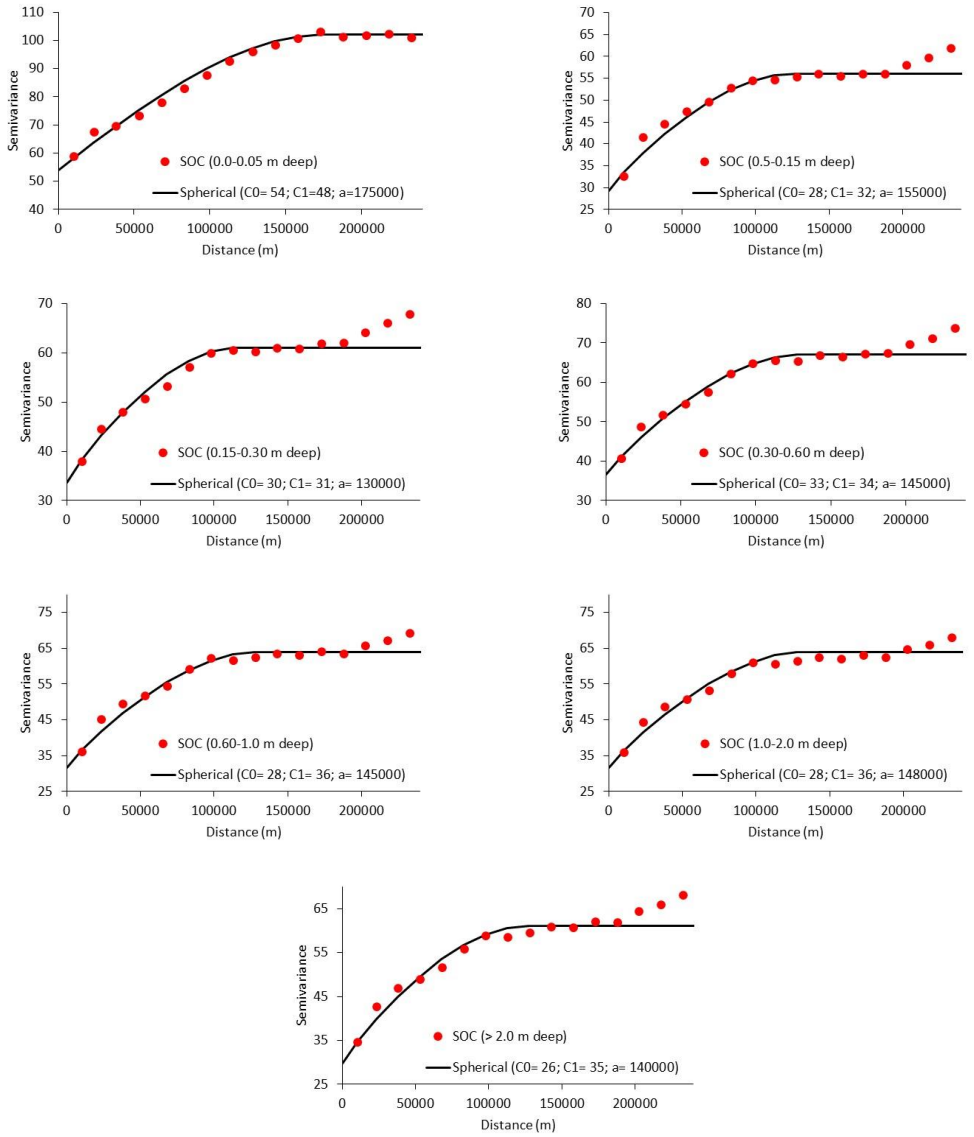
Desta forma, é preciso considerar a interação entre os parâmetros de ajuste do semivariograma para se determinar a melhor representação da variabilidade espacial de um fenômeno qualquer expresso por meio do semivariograma, conforme descrito por Siqueira et al. (2006). Tal afirmação corrobora para os dados de grau de dependência espacial (GD, %) que foi classificado conforme Cambardelaa et al. (1994), em quer todas as camadas em estudo apresentam médio grau de dependência espacial. A variabilidade dos dados neste caso pode estar relacionada com as diferenças altimétricas ao longo da paisagem e por sua vez, com a variação climática na região da Amazônia Maranhense. Mais uma vez a primeira camada do solo em estudo foi a que apresentou o maior valor de grau de dependência espacial (GD = 52,94%) para a camada de 0.0-0.05m de profundidade.

As demais camadas em estudo apresentaram valores de grau de dependência espacial muito próximos, e mais uma vez é possível averiguar que as camadas superficiais foram as que apresentaram maiores valores de grau de dependência espacial, quando comparados aos dados das camadas em subsuperfície.

Os semivariogramas ajustados são apresentados na Figura 4. Verifica-se que apenas o semivariograma para a camada de 0.0-0.05m de profundidade foi o que apresentou comportamento distinto dos demais semivariogramas dos atributos em estudo, principalmente quando avaliou-se o valor de alcance (a, m) que para a

camada de 0.0-0.05m de profundidade é de 175000m ou 175km, enquanto que os demais atributos tiveram um alcance médio de 144,66km, indicando que até esta distância as amostras são semelhantes entre si, depois disso a variabilidade dos dados em estudo é ao acaso.

Figura 4 - Semivariogramas ajustados para o conteúdo de carbono orgânico no solo da Amazônia Maranhense nas camadas de 0.0-0.05m, 0.05-0.15m, 0.15-0.30m, 0.3-0.6m, 0.6-0.1.0m, 1.0-2.0m e > 2.0m de profundidade



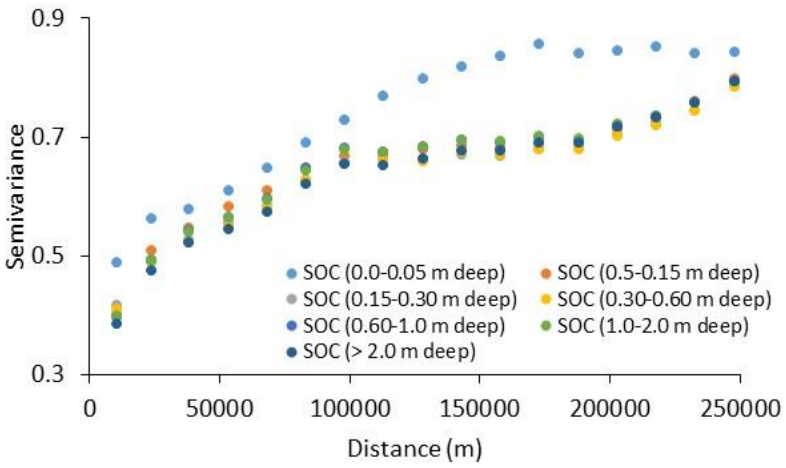
Fonte: Elaboração Própria (2019)

Os gráficos dos semivariogramas ajustados apresentados na Figura 4 podem ser relacionados com a Figura 1 que descreve a variação altimétrica na região da Amazônia Maranhense. Na Figura 1 podemos descrever 3 zonas de relevo distintas, uma associada à paisagem costeira com relevo plano, cujos valores de relevo

variam entre 0-80m de altitude, uma zona com relevo suave presente na parte central da Amazônia Maranhense com valores de altitude variando entre 80-150m; e uma terceira zona de relevo (>150m) localizada no sul da Amazônia Maranhense. É importante observar na Figura 1 que a delimitação dessas zonas altimétricas possuem cerca de 150km, relacionando-se desta maneira com os valores de alcance encontrados nesse estudo, com isso pode-se afirmar que o relevo é um fator limitante para a manifestação do conteúdo de carbono orgânico do solo nas diferentes camadas em estudo (0.0-0.05m, 0.05-0.15m, 0.15-0.30m, 0.3-0.6m, 0.6-0.1.0m, 1.0-2.0m e > 2.0m de profundidade).

A Figura 5 apresenta o semivariograma escalonado para os atributos em estudo. É possível averiguar que apenas a camada mais superficial (0.0-0.05m de profundidade) apresenta comportamento espacial distinto das demais camadas. Nesse caso, a camada de 0.0-0.05m de profundidade é a que mais apresenta variação e por sua vez, é a mais suscetível às mudanças do uso e cobertura da terra, por outro lado, também é nesta camada que se encontra a maior quantidade de carbono orgânico armazenada no solo. A maior diferença entre a camada de 0.0-0.05m de profundidade e as demais camadas em estudo (0.05-0.15m, 0.15-0.30m, 0.3-0.6m, 0.6-0.1.0m, 1.0-2.0m e > 2.0m de profundidade) expressa pelas diferenças no semivariograma escalonado desses atributos evidenciou-se melhor a analogia descrita anteriormente por meio do mapa altimétrico (Figura 1).

Figura 5 - Semivariograma escalonado para o conteúdo de carbono orgânico no solo na Amazônia Maranhense nas camadas de 0.0-0.05m, 0.05-0.15m, 0.15-0.30m, 0.3-0.6m, 0.6-0.1.0m, 1.0-2.0m e > 2.0m de profundidade



Fonte: Elaboração Própria (2019)

Os mapas de variabilidade espacial (Figuras 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12) demonstram que o conteúdo de carbono no solo apresenta comportamento similar na sua distribuição, e que os compartimentos assinalados anteriormente em função do relevo permanecem. Por outra parte, se verifica que nas camadas superficiais (0.0-0.05m, 0.05-0.15m e 0.15-0.3m de profundidade) o conteúdo de carbono orgânico encontra-se associado aos compartimentos costeiro e sul da região Amazônica Maranhense, enquanto que nos mapas de variabilidade espacial do conteúdo de carbono nas camadas mais profundas (0.3-0.6m, 0.6-0.1.0m, 1.0-2.0m e > 2.0m de profundidade) os maiores valores de conteúdo de carbono orgânico estão associados ao compartimento central da área da Amazônia Maranhense, localizados no segundo compartimento de relevo.

Na camada de 0.0-0.05m é possível evidenciar maior conteúdo de carbono orgânico nessa camada na região da Baixada Maranhense e ao sul da Região da Amazônia Maranhense. Para os demais mapas de variabilidade espacial o conteúdo de carbono orgânico em profundidade ocorre em maiores quantidades em diferentes regiões da Amazônia Maranhense, fato que corrobora para que relevo, geologia, geomorfologia, classes de solo e clima influenciem em maior ou menor escala a sua manifestação na área de estudo.

Figura 6 - Mapa de variabilidade espacial da matéria orgânica do solo na Amazônia Maranhense na camada de 0.0-0.05m de profundidade

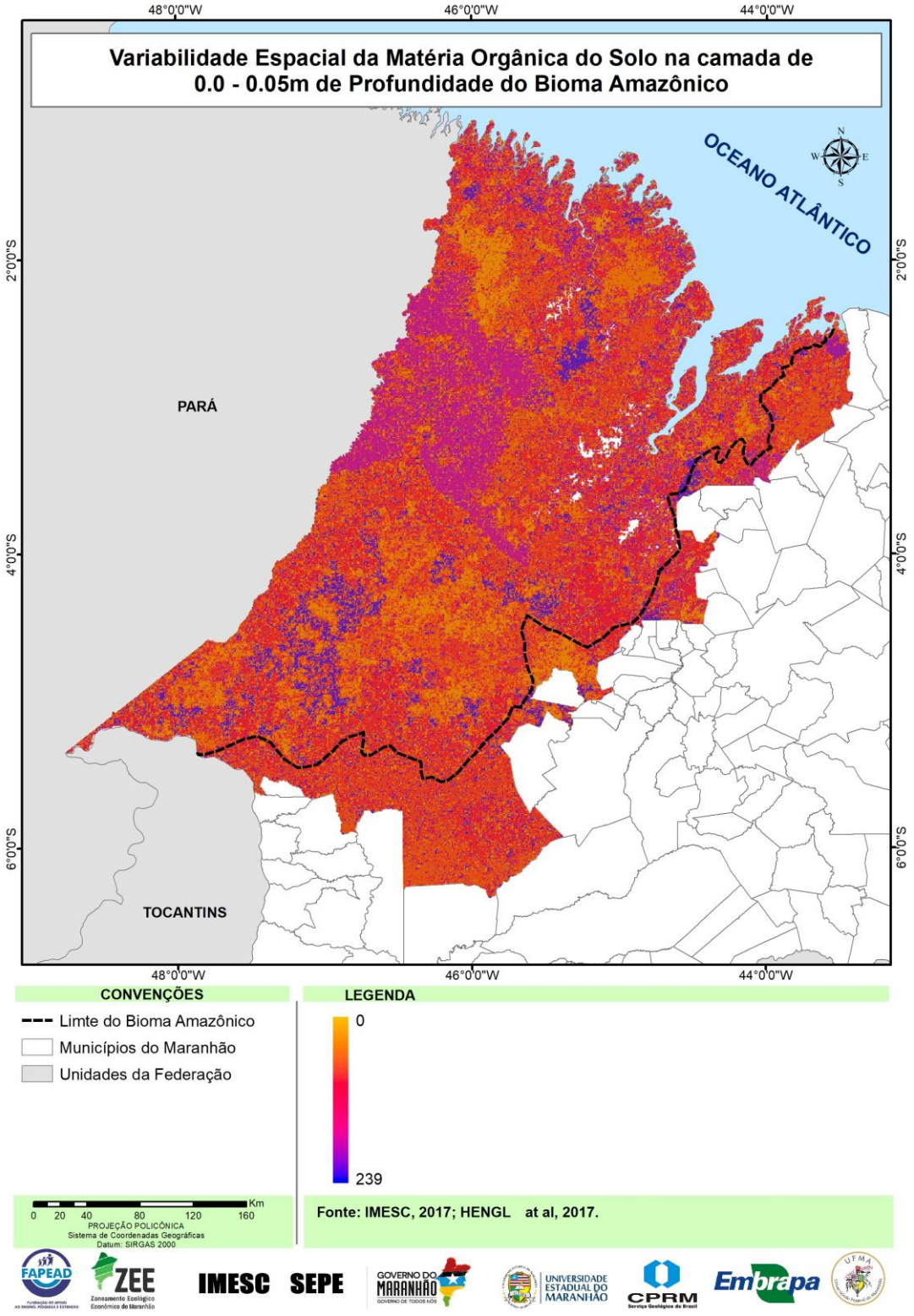


Figura 7 - Mapa de variabilidade espacial da matéria orgânica do solo na Amazônia Maranhense na camada de 0.05-0.15m de profundidade

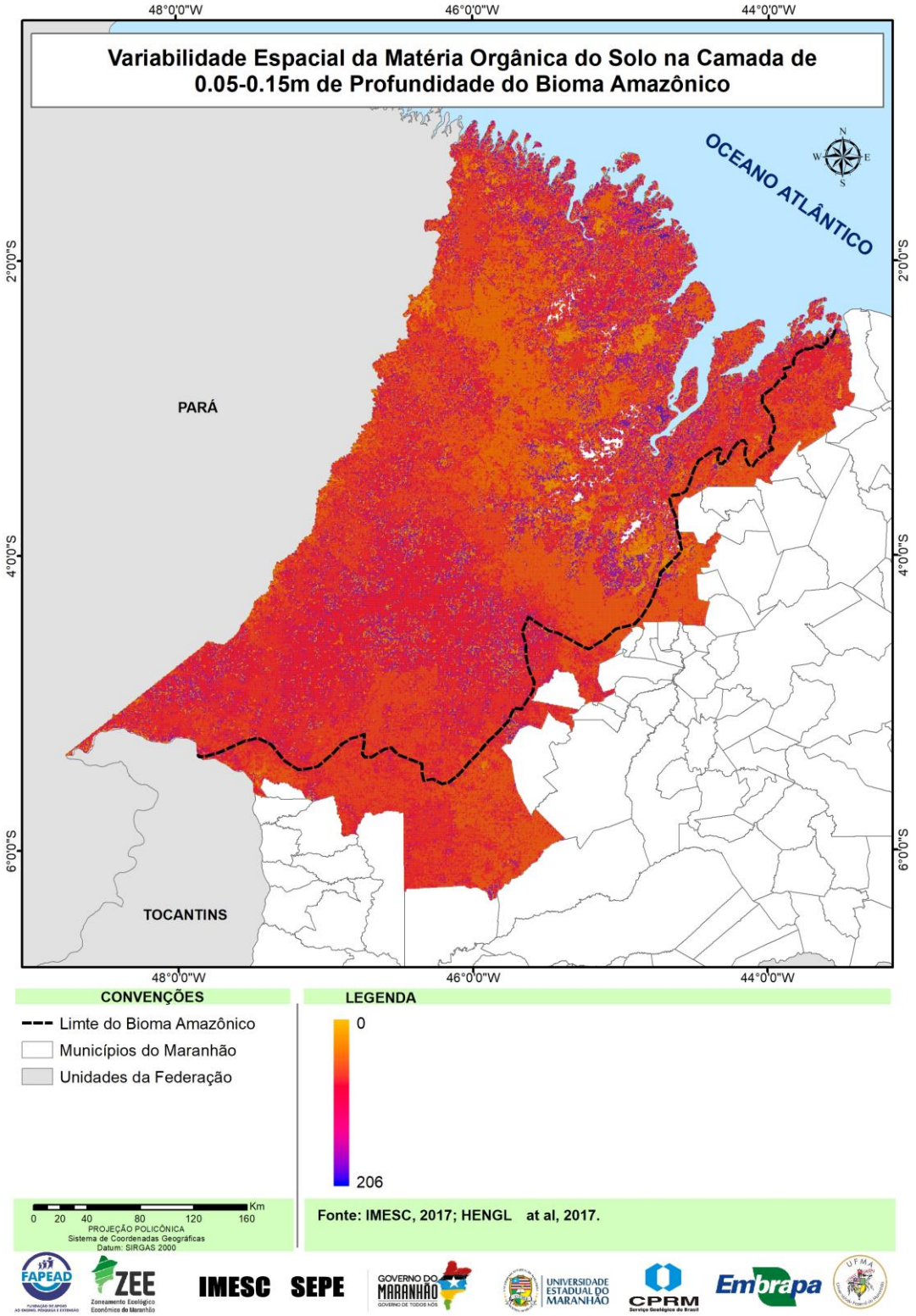


Figura 8 - Mapa de variabilidade espacial da matéria orgânica do solo na Amazônia Maranhense na camada de 0.15-0.30m de profundidade

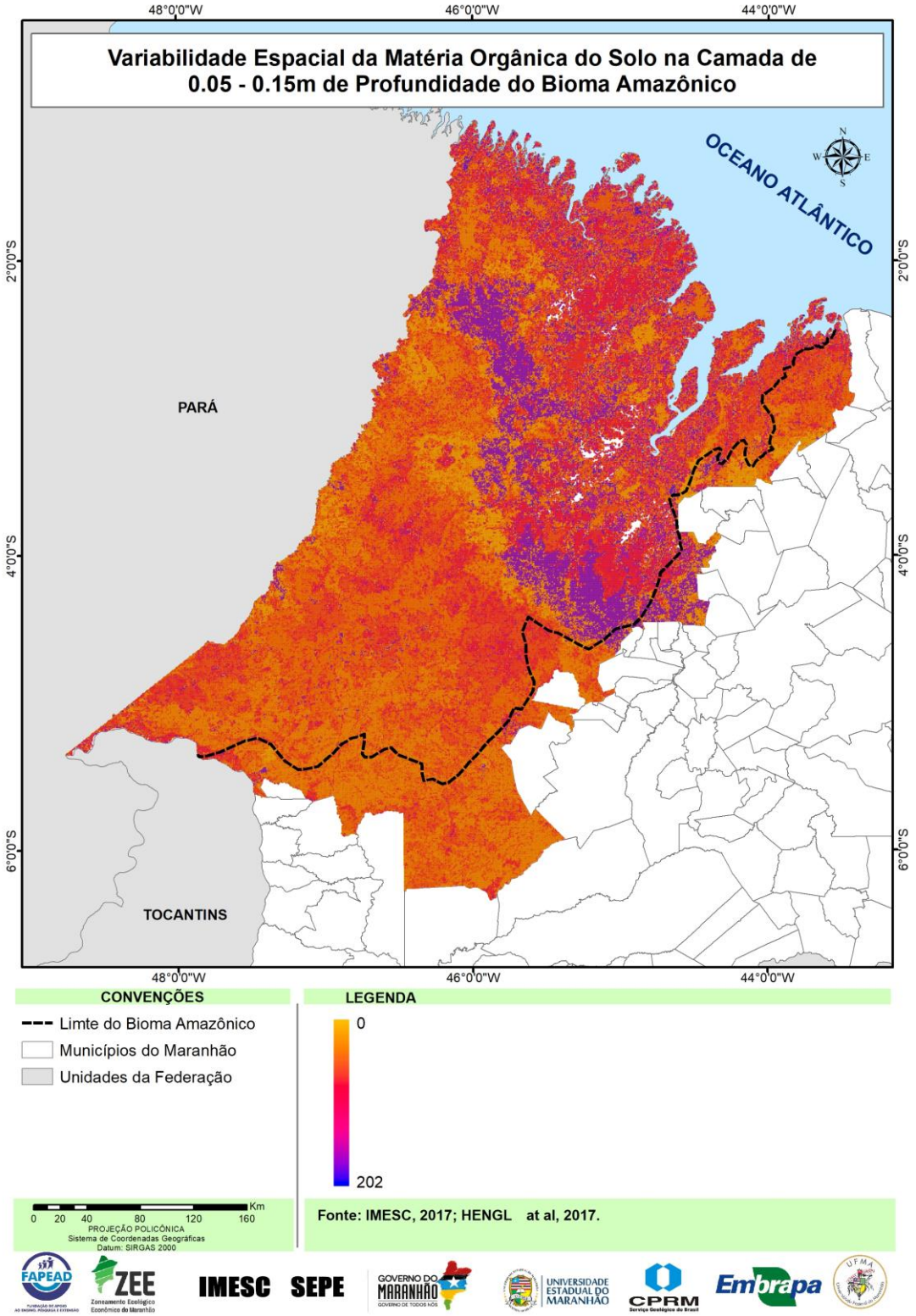


Figura 9 - Mapa de variabilidade espacial da matéria orgânica do solo na Amazônia Maranhense na camada de 0.3-0.6m de profundidade

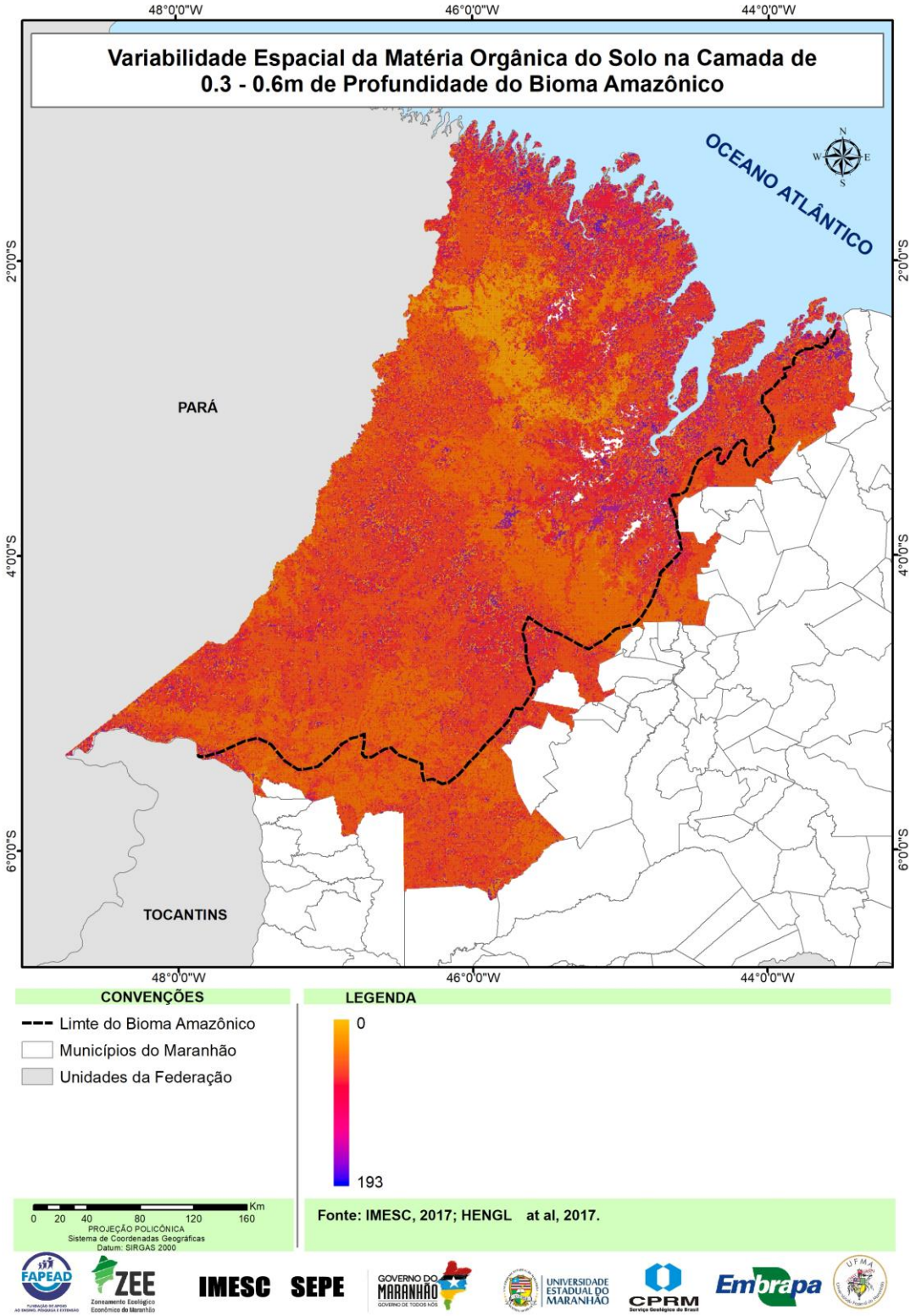


Figura 10 - Mapa de variabilidade espacial da matéria orgânica do solo na Amazônia Maranhense na camada de 0.6-1.0m de profundidade

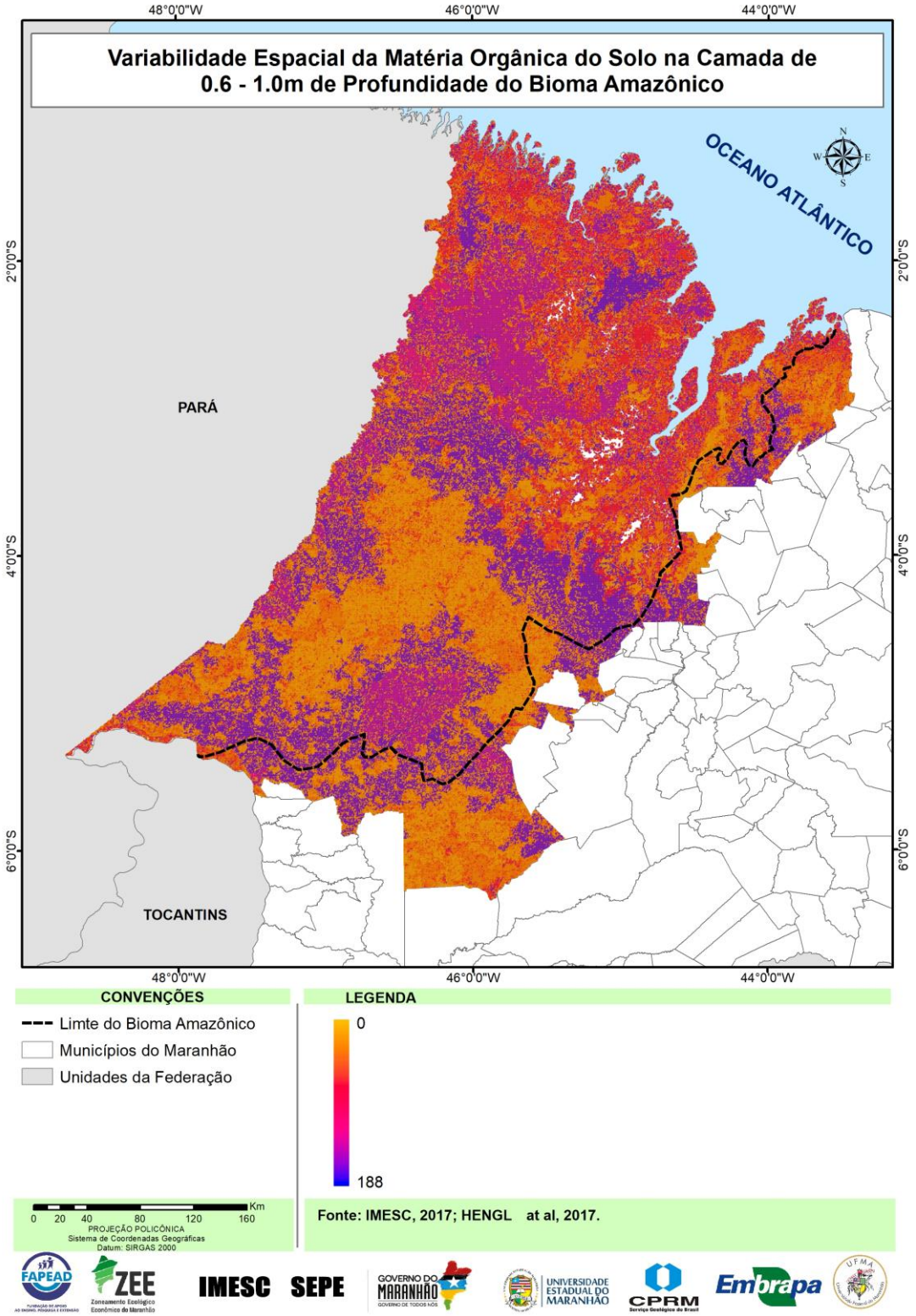


Figura 11 - Mapa de variabilidade espacial da matéria orgânica do solo na Amazônia Maranhense na camada de 1.0-2.0m de profundidade

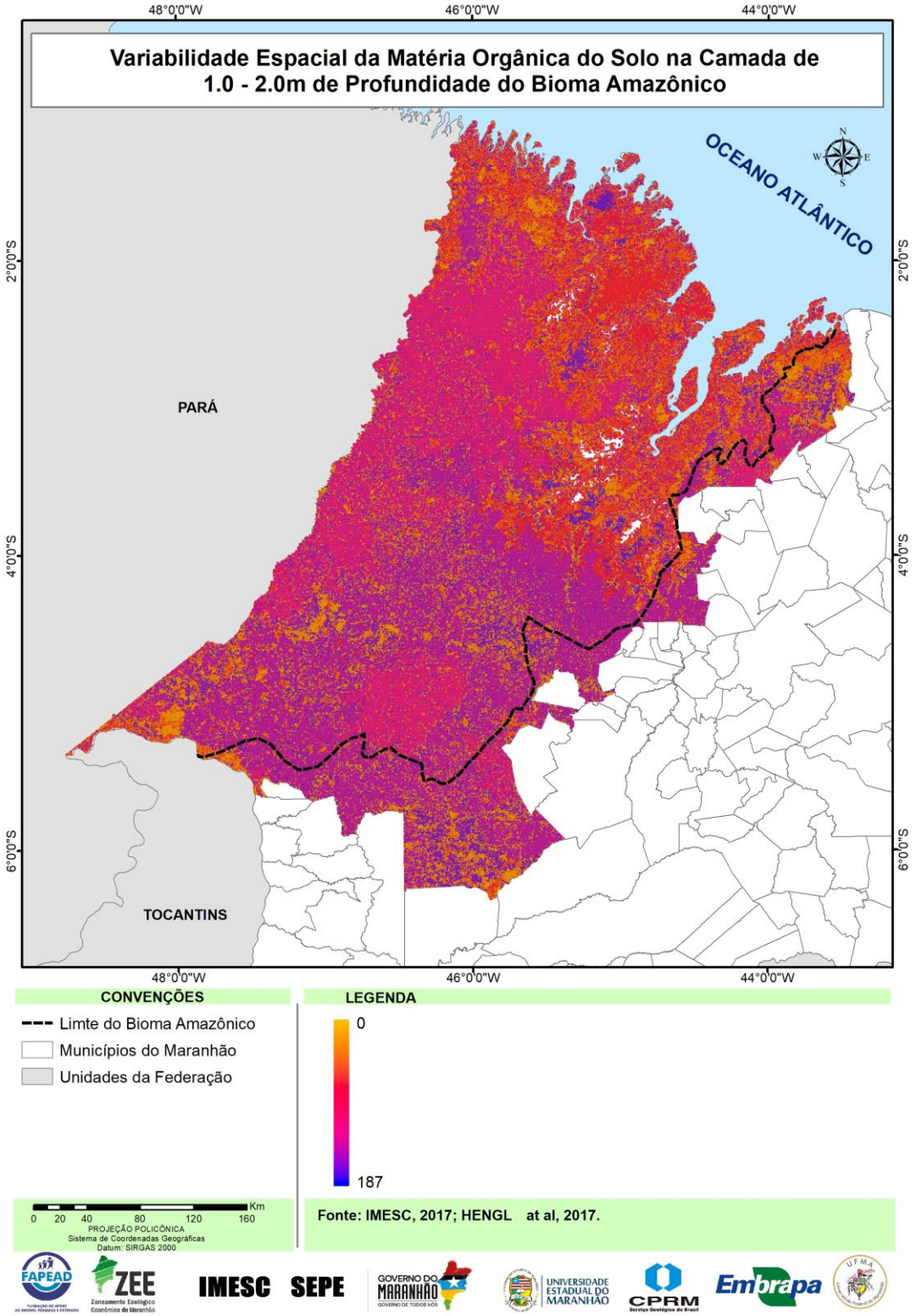
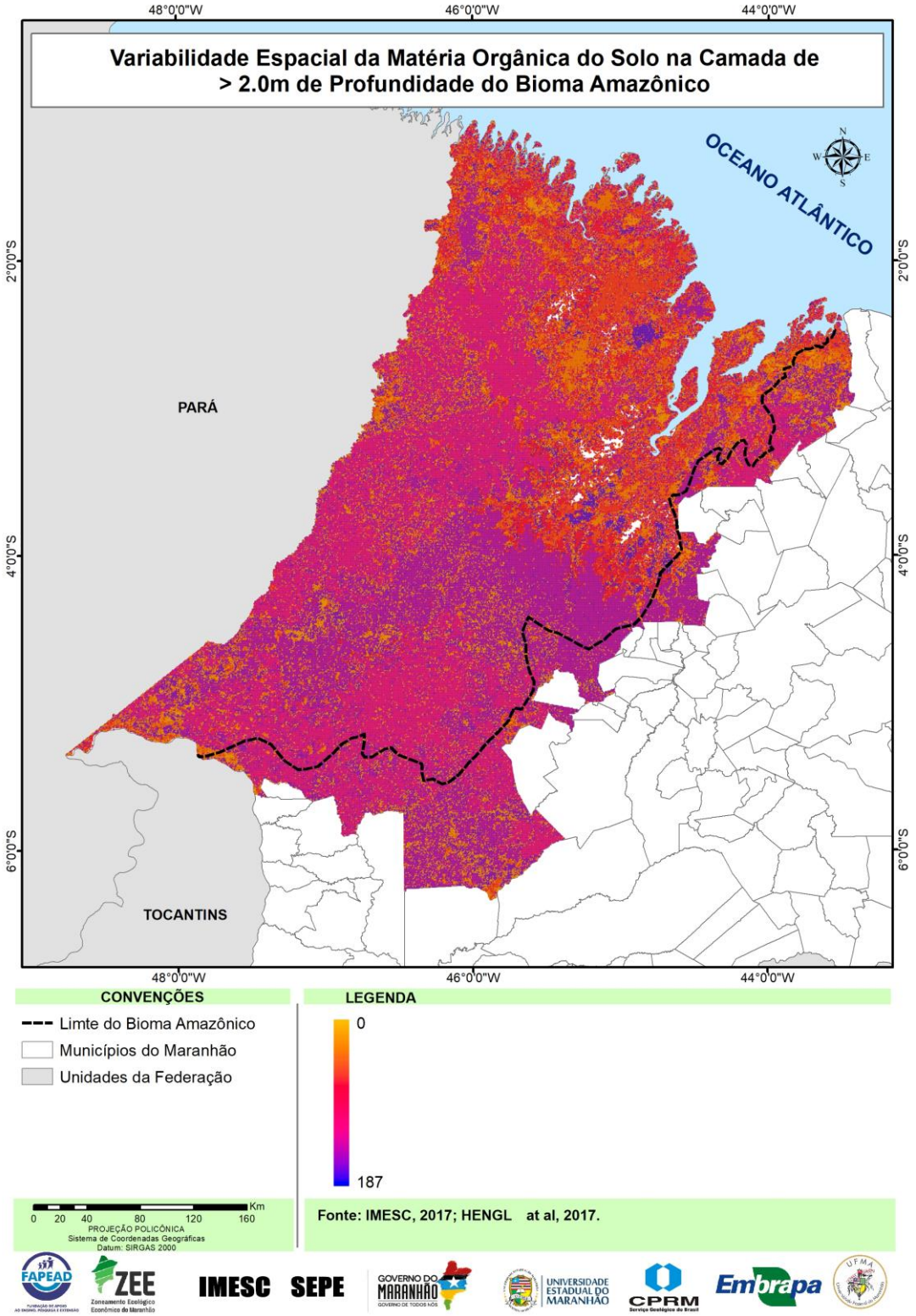


Figura 12 - Mapa de variabilidade espacial da matéria orgânica do solo na Amazônia Maranhense na camada > 2.0m de profundidade



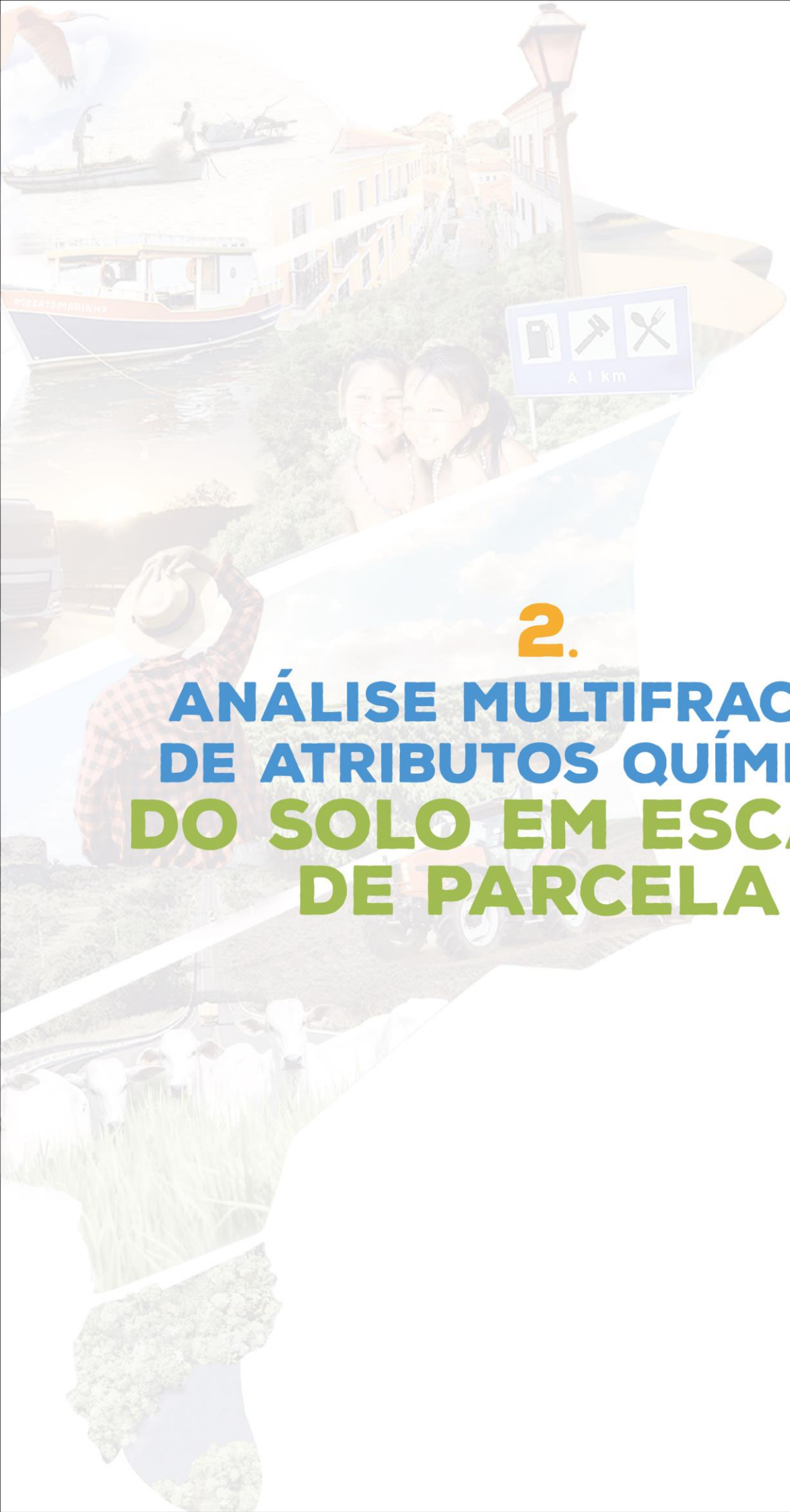
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O solo é responsável pelo sequestro e armazenamento de carbono da atmosfera, sendo que a quantidade de carbono armazenado no solo é maior que na atmosfera. No entanto, as mudanças na cobertura da terra favorecem a oxidação da matéria orgânica do solo, contribuindo para as mudanças climáticas. Sabe-se também que a manutenção de quantidades ótimas de matéria orgânica no solo contribui para a preservação de características biológicas, físicas e químicas do solo, e que a sua perda para a atmosfera causa a depauperação do solo, com consequências importantes para o desenvolvimento sustentável.

Na Amazônia Maranhense não existem estudos específicos de mapeamento do carbono orgânico do solo, tornando este estudo um marco sobre o conhecimento em relação à dinâmica do conteúdo de carbono no solo. Nesse contexto, as principais considerações desse estudo preliminar são:

a) A camada superficial (0.0-0.05m de profundidade) foi a camada com maiores valores de carbono orgânico no solo da Amazônia Maranhense, sendo esta a camada que mais sofre interferência e perdas para atmosfera de carbono com as mudanças no uso e cobertura do solo, necessitando o desenvolvimento de tecnologias adaptadas às características da região;
b) Nas camadas mais profundas o conteúdo de carbono orgânico é mais variável, fato comprovado pelos elevados valores de coeficiente de variação. Todavia, este comportamento é justificado principalmente pelas variações de relevo, solo e clima na Amazônia Maranhense;
c) O uso de ferramentas de geoestatística permitiu a identificação de padrões de variabilidade espacial em diferentes escalas, sendo: a) a camada superficial apresentou maior valor de alcance; o valor de alcance médio está em torno de 144,66 km, indicando que até esta distância as amostras possuem relação entre si; b) os parâmetros de ajuste do semivariograma podem ser justificados, em função das classes de relevo presentes na área da Amazônia Maranhense; c) o semivariograma escalonado demonstrou que o conteúdo de carbono no solo em todas as camadas estudadas possuem um padrão comum de distribuição, conforme ocorrem distintas classes de relevo na área.
d) Os mapas de variabilidade espacial demonstram que a dinâmica do carbono

do solo na área de estudo é influenciado por diferentes fatores ambientais, merecendo estudos em escalas espacial distintas para se caracterizar melhor as características intrínsecas e extrínsecas que inferem sobre o seu conteúdo no solo, e consequentemente para a geração tecnologia de manejo do solo que permitam a minimização dos impactos ambientais, manutenção das áreas de preservação e o desenvolvimento humano na região.



2.
ANÁLISE MULTIFRACTAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM ESCALA DE PARCELA

1 INTRODUÇÃO

A elevada intensidade de manejo do solo na cultura de cana-de-açúcar no Brasil apresenta muitos problemas de degradação dos seus atributos biológicos, físicos e químicos. Assim, o conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo é importante, pois, possibilita o manejo localizado (SOUZA et al., 2010), minimizando os impactos negativos ocasionados pelo manejo do solo (MARINHO et al., 2017).

O estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo deve considerar a sua variação em diferentes escalas espaciais, que podem ser horizontais ou verticais (LEIVA et al., 2019). Portanto, para melhor entendimento da dinâmica espacial dos atributos do solo são necessários métodos que sejam capazes de avaliar a variação em escalas até então ignoradas. A análise multifractal tem permitido a compreensão da variação de medidas dentro de um sistema (JORGE et al., 2008) que pode ser caracterizado como monoescala ou multiescala. Um sistema multiescala ou multifractal compreende subconjuntos fractais entrelaçados com várias dimensões expressas pelo espectro de singularidade (HENTSCHEL; PROCACCIA, 1983; VIDAL VÁZQUEZ et al., 2013; YAKIMOV et al., 2014; PAZ FERREIRO et al., 2018; SIQUEIRA et al., 2018; YAKIMOV et al., 2018).

A análise multifractal permite analisar fenômenos que apresentam variabilidade espacial e temporal de forma quantitativa, sendo cada vez mais reconhecida a sua aplicabilidade aos atributos do solo (CANIEGO et al., 2005; VIDAL VÁZQUEZ et al., 2010; SIQUEIRA et al., 2013; BERTOL et al., 2017; SIQUEIRA et al., 2018; LEIVA et al., 2019).

Jorge et al. (2008) estudando solos cultivados e não cultivados concluíram que há maior grau de multifractalidade nos solos cultivados, pois são sistemas mais caóticos, e assim estão em constante mudanças ao longo de todo o perfil. Siqueira et al. (2018) estudando atributos químicos em um transecto por meio de ferramentas multifractais determinou que os atributos químicos do solo possuem elevada multifractalidade. Marinho et al. (2017) avaliando o conteúdo de carbono orgânico em transectos verticais determinou diferentes graus de multifractalidade relacionados com a intensidade de uso do solo.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi avaliar a multifractalidade de atributos químicos nas camadas de 0-0,2 e 0,2-0,4m de um Latossolo Vermelho em escala de parcela no Bioma Amazônico Maranhense.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área experimental

A área de estudo possui 4,41ha e está localizada na Usina Maity Bioenergia, município de Imperatriz (Maranhão, Brasil), sendo a área irrigada por meio de pivot linear nos períodos de estiagem, com aplicação de 60mm ha^{-1} de vinhaça no início de cada ano agrícola. O clima da região é classificado Aw, com precipitação média anual de 1.181mm e duas estações bem definidas: uma chuvosa (janeiro a junho) e uma estação seca (julho a dezembro), e temperatura média anual de 29ºC.

O solo da área de estudo é um Latossolo Vermelho Distrófico argiloso (EMBRAPA, 2018), cujas principais características químicas são apresentadas na Tabela 1. A área é cultivada com cana-de-açúcar (variedade RB92579) desde 1980, com corte e queima manual, e em setembro de 2014 a área foi renovada, gradeada, subsolada e aplicado como fonte de matéria orgânica em superfície 30 t ha^{-1} de torta de filtro com composição aproximada de H_2O = 77,7%, MO = 16,9%, N = 0,28%, K = 56,64mg, P = 1,18 mg e Mg = 76,9%. A calagem é realizada em superfície utilizando calcário dolomítico com 15% MgO 28% de CaO. O plantio foi realizado em sulcos com profundidade média de 0,3m, com cerca de 15 gemas por metro linear com aplicação localizada de NPK no sulco.

Tabela 1 - Caracterização física e química do solo, Maranhão, Brasil.

0-0,2 m								
MO	pH	P	K	Ca	Mg	CTC	SB	V%
g kg^{-1}	$CaCl_2$	mg dm^{-3}	---------- mmol$_c$ dm^{-3} ----------					
15,0	5,2	16,6	4,7	18,2	12,9	61,0	43,1	70
0,2-0,4 m								
10,67	5,36	20,89	4,39	18,94	12,93	63,38	43,5	68,1

Fonte: Elaboração Própria (2019)
MO: Matéria orgânica; P: Fósforo; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg Magnésio; SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de troca catiônica; V%:

3.2 Amostragem

As amostras de solo foram coletadas no dia 28/01/2019, em 441 pontos amostrais distribuídos em uma malha regular com espaçamento entre pontos de 10m, nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m de profundidade.

Os seguintes atributos químicos do solo nos 441 pontos de amostragem foram determinados por meio de metodologia proposta por Raij et al, (2001): matéria orgânica (MO, g dm^{-3}), pH em solução de $CaCl_2$, fósforo (P, mg dm^{-3}), potássio (K, $mmol_c$ dm^{-3}), cálcio (Ca, $mmol_c$ dm^{-3}), magnésio (Mg, $mmol_c$ dm^{-3}) e sódio (Na, $mmol_c$ dm^{-3}); e, após a realização da análise química foram calculados os seguintes atributos de fertilidade do solo: capacidade de troca catiônica (CTC, $mmol_c$ dm^{-3}), soma de bases (SB, $mmol_c$ dm^{-3}) e porcentagem de saturação por bases (V%).

3.3 Estatística descritiva e análise multifractal

Os principais momentos estatísticos [média, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria, curtose e D (desvio máximo em relação à distribuição normal por meio do teste de Kolmogorov-Sminorv, $P \leq 0,01$)].

A análise multifractal foi realizada por meio do método *box-counting*, em que a probabilidade de P para sistemas heterogéneos, conforme Eq. (1):

$$P_i(\varepsilon) \sim \varepsilon^{\alpha_i} \quad (1)$$

sendo α_i a força de singularidade ou expoente de Lipschitz-Hölder, ε é a escala. Se pode caracterizar os conjuntos multifractais sobre a base das dimensões generalizadas do momento de ordem q em uma distribuição, Dq (Posadas et al., 2005), Eq. (2):

$$D_q = \lim_{\varepsilon \to 0} \left(\frac{1}{q-1} \frac{\log \mu(q,\varepsilon)}{\log(\varepsilon)} \right) \quad (2)$$

A Eq. (2) é converte em:

$$D_0 = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\log(N(\varepsilon))}{\log(\varepsilon)} \quad (3)$$

$$D_1 = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i(\varepsilon) \log(\mu_i(\varepsilon))}{\log(\varepsilon)} \quad (4)$$

$$D_2 = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\log(C(\varepsilon))}{\log(\varepsilon)} \quad (5)$$

A dimensão zero, D_0 é chamada de dimensão de capacidade, que proporciona uma visão global de um sistema; D_1 é chamada de dimensão de

informação, que está relacionada à informação da entropia (entropia de Shannon) e D_2 é conhecida com dimensão de correlação que calcula a correlação das medidas contidas em uma caixa de tamanho ε (Posadas et al., 2005).

Em monofractais os valores de D_1 e D_2 se tornam semelhantes a D_0, e só ocorre quando o fractal é autosimilar e homogêneo, porém, no caso de multifractais, os espectros de dimensões diferentes q seguem a relação: $D_0 > D_1 > D_2$, conforme Eq. (6) e (7):

$$f(q) = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{\log(N)} \sum_{i=1}^{N(L)} \mu_i(q,L) \log[\mu_i(q,L)] \qquad (6)$$

$$\alpha(q) = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{\log(N)} \sum_{i=1}^{N(L)} \mu_i(q,L) \log[P_i(L)] \qquad (7)$$

Os momentos de ordem q da distribuição estatística variaram em incrementos de 1 em 1.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

Os parâmetros estatísticos são apresentados na Tabela 1. O valor médio do teor de MO foi maior para a camada superficial (MO = 16,6 g kg^{-1}) em comparação com a camada de 0,2-0,4m (MO = 11,31 g kg^{-1}). O conteúdo de MO é um indicador de qualidade do solo que contribui diretamente para fertilidade do solo e desenvolvimento das culturas (Castellano et al., 2015). Os valores de pH demonstram presença de baixa acidez nas duas camadas em estudo, conforme classificação de Raij et al. (2001). O conteúdo de P, Ca, SB e CTC apresentaram maiores teores médios na profundidade de 0,2-0,4m, resultado do manejo do solo adotado na área com adubação de plantio em profundidade.

Os atributos em estudo na sua maioria apresentaram valores médios de CV (%), conforme classificação de Warrick e Nielsen (1980), com exceção do conteúdo de MO (0-0,2m) e P (0,2-0,4m) que apresentaram valores de CV elevados (CV ≥ 60%). De acordo com o teste de Kolmogorov-Sminorv os atributos químicos do solo nas profundidades em estudo, apresentaram distribuição de frequência lognormal, exceto a SB (0-0,2m) que apresentou distribuição de frequência normal.

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise multifractal. Os valores de Δα ou variação do expoente de Hölder, foram maiores na profundidade de 0-0,2m, com exceção do P (Δα = 0,487 na profundidade 0-0,2 m e Δα = 0,953 na profundidade 0,2-0,4m). A análise de Δα, na profundidade 0,2-0,4m apresenta-se mais estável, uma vez que possui menor grau de multifractalidade do sistema, sendo mais homogêneo quando comparada com a profundidade 0-0,2m correspondendo a um sistema caótico, indicando influência do manejo adotado, pois a adubação de plantio é realizada na camada subsuperficial, favorecendo maior homogeneização dos atributos químicos do solo em profundidade. Na profundidade 0-0,2m, o Mg (Δα = 1,116) apresentou maior grau de multifractalidade ou heterogeneidade, seguido pelo K (Δα = 1,107), e MO (Δα = 0,684). Para a profundidade 0,2-0,4m, o conteúdo de Mg (Δα = 1,058), P (Δα = 0,953) e MO (Δα = 0,286) apresentaram os maiores graus de multifractalidade.

Os valores de dimensão para os atributos químicos na área de estudo (Tabela 2) demonstram que os dados possuem tendência multifractal ($D_0 > D_1 > D_2$). A dimensão de capacidade (D_0) apresentou valores constantes ($D_0 = 2$) para maioria dos atributos, com exceção do Mg ($D_0 = 1,99$ - 0-0,2 m) e P ($D_0 = 1,99$ - 0,2-0,4 m),

que apresentaram valores não medidos para um ou mais pontos de amostragem. A dimensão de entropia ou dimensão de informação (D_1) na camada superficial variou de D_1 = 2 (V%) e D_1 = 1,94 (MO), enquanto que na camada subsuperficial, a variação foi de D_1 = 2 (pH e V%) e de D_1 = 1,879 (P).

Os valores de dimensão de informação avaliam a desordem dos valores no banco de dado ou na distribuição de uma variável, sendo valores compreendidos entre $0 < D_1 < 1$, quando a escala avaliada tende a 0 (Gouyet, 1996). Um valor de D_1 próximo a 1 caracteriza um sistema uniforme distribuído para todas as escalas, enquanto, um valor de D_1 próximo a 0 indica um subconjunto de escalas na qual as irregularidades estão concentradas. Assim, o V% (0-0,2 m) pH e V% (0,2-0,4 m) expressaram uma relação de $D_0 = D_1$, não havendo graus de heterogeneidade entre as dimensões, D_0 e D_1.

Para a dimensão de correlação (D_2), o maior valor foi descrito para V% (D_2 = 1,99) e o menor para MO (D_2 = 1,85) para a camada superficial do solo (0-0,2 m). Na camada subsuperficial (0,2-0,4 m) o maior valor foi descrito para o pH e V% (D_2 = 1,99), e o menor valor foi descrito para P (D_2 = 1,79). Matematicamente, a função de D_2 computa a correlação de medidas contidas nos intervalos de tamanho L (JORGE et al., 2008), demonstrando os atributos que possuem variação interna nas escalas correlacionadas em maior ou menor grau entre si.

Para que um sistema seja multifractal os valores de dimensão devem obedecer à relação $D_0 > D_1 > D_2$ (Banerjee et al., 2011; Vidal Vázquez et al., 2013; Siqueira et al., 2018). Para alguns dos atributos químicos avaliados, a relação obtida foi de $D_0 = D_1 > D_2$, embora haja uma homogeneidade entre D_0 e D_1, o sistema não pode ser considerado estatisticamente autossimilar e homogêneo, porque ao se avaliar o sistema como um todo, deve-se considerar a heterogeneidade entre as três dimensões. Desta maneira, a avaliação conjunta das dimensões (D_0, D_1 e D_2), permite inferir que os atributos avaliados mantêm variações no grau de multifractalidade em diferentes escalas, indicando a presença de sistemas multifractais para os atributos químicos do solo nas duas camadas em estudo (0-0,2 e 0,2-0,4 m).

Os valores de Δf, Δf_{max} e Δf_{min} estão associados à simetria da curva do espectro de singularidade dos dados. Nesse caso, os maiores valores de Δf na profundidade 0-0,2 m foram encontrados para o conteúdo de Na (Δf = -0,94), MO (Δf = 0,90), Mg (Δf = -0,86) e P (Δf = 0,77); na profundidade 0,2-0,4m as maiores

variações foram encontradas para o Mg (Δf = 0,89), P (Δf = 0,44) e MO (Δf = -0,36). A variação nos valores de Δf_{max} para a profundidade 0-0,2m foi maior para o K (Δf_{max} = 1,64) e menor para o V% (Δf_{max} = 0,01). Na profundidade 0,2-0,4m, a maior variação foi para P (Δf_{max} = 0,62) e menor para pH (Δf_{max} = 0,004). Para os valores de $\Delta f_{min,}$ a camada superficial apresentou o mesmo comportamento para os atributos K ($\Delta f_{min,\ =}$ 1,67) e V% ($\Delta f_{min,\ =}$ 0,05) e na camada subsuperficial, o Mg ($\Delta f_{min\ =}$ 1,23) apresentou a maior variação e o pH ($\Delta f_{min\ =}$ 0,007) a menor variação. Os valores de Δf_{max} e Δf_{min} definem o aspecto simétrico ou assimétrico da curva do espectro de singularidade, ou seja, por meio das variações de Δf_{max} e Δf_{min} pode se conhecer onde reside o domínio de valores na escala medida. De forma conceitual, o Δf caracteriza os arranjos estatísticos dos fractais, sendo f a entropia do sistema avaliado (JORGE et al., 2008).

Tabela 1 - Estatística descritiva os atributos químicos do solo na área de estudo.

0-0,2 m								
Parâmetros	Unidade	Média	Desvio Padrão	Variância	CV%	Assimetria	Curtose	D*
MO	g kg^{-1}	16,66	10,57	111,87	63,50	2,97	13,48	0,20Ln
pH	$CaCl_2$	5,29	0,39	0,15	7,50	-0,14	-0,68	0,10Ln
P	mg dm^{-3}	15,87	8,90	79,21	56,10	2,11	7,14	0,15Ln
K	$mmol_c$ dm^{-3}	4,91	1,62	2,62	33,00	5,31	49,79	0,17Ln
Ca	$mmol_c$ dm^{-3}	18,97	5,32	28,39	28,10	0,39	-0,13	0,07Ln
Mg	$mmol_c$ dm^{-3}	12,97	4,05	16,44	31,30	0,15	2,59	0,11Ln
Na	$mmol_c$ dm^{-3}	7,90	1,72	2,96	21,18	0,47	1,07	0,10Ln
SB	$mmol_c$ dm^{-3}	44,76	9,40	88,39	21,10	0,17	-0,46	0,05n
CTC	$mmol_c$ dm^{-3}	63,78	11,56	133,76	18,10	0,30	0,07	0,05Ln
V%	$mmol_c$ dm^{-3}	70,29	8,24	67,91	11,70	-1,13	1,40	0,09Ln
0,2-0,4 m								
MO	g kg^{-1}	11,31	7,46	2,73	24,10	0,87	1,01	0,09Ln
Ph	$CaCl_2$	5,44	0,14	0,37	6,90	-0,12	-0,82	0,09Ln
P	mg dm^{-3}	19,99	217,85	14,76	73,80	1,53	4,17	0,13Ln
K	$mmol_c$ dm^{-3}	4,47	0,74	0,86	19,30	0,08	-0,31	0,08Ln
Ca	$mmol_c$ dm^{-3}	20,88	30,95	5,56	26,60	0,27	-0,88	0,08Ln
Mg	$mmol_c$ dm^{-3}	12,72	24,76	4,97	39,10	1,34	2,76	0,15Ln
Na	$mmol_c$ dm^{-3}	7,36	1,17	1,08	15,70	0,26	0,14	0,05Ln
SB	$mmol_c$ dm^{-3}	45,45	68,70	8,28	18,10	0,44	-0,40	0,10Ln
CTC	$mmol_c$ dm^{-3}	64,97	66,87	8,17	12,60	0,82	1,03	0,10Ln
V%	$mmol_c$ dm^{-3}	69,56	29,16	5,40	7,80	-0,48	-0,26	0,09Ln

Fonte: Elaboração Própria (2019)

O gráfico de dimensão generalizada (Figura 1A) para o conteúdo de Mg na camada superficial (0-0,2m de profundidade) demonstra que nos momentos q = 0 a q = -5 existe diferenciação nos momentos da dimensão (q = 0 a q = -5) quando comparado aos demais atributos químicos do solo. A diferenciação do Mg na

camada superficial demonstrada pelo gráfico de dimensão generalizada pode ser resultado do manejo do solo aplicado na área de cultivo com cana-de-açúcar, que recebe calcário dolomítico com cerca de 15% de MgO aplicado em superfície, demonstrando que mesmo sendo o Mg um elemento móvel no solo, a correção da acidez do solo interfere sobre o comportamento multifractal deste elemento. O conteúdo de K, P e MO nos momentos q = 0 a q = 5 (Figura 1A) demonstra que estes elementos possuem diferenciação na dimensão para estes momentos. Desta maneira, o manejo do solo na área de estudo com aplicação de torta de filtro alterou a multifractalidade do K, P e MO nestes momentos (q = 0 a q = 5). O gráfico de dimensão generalizada para o pH, CTC e H+Al na camada superficial (Figura 1A) demonstra que estes atributos possuem comportamento monofractal.

A dimensão generalizada na camada subsuperficial (0,2-0,4m de profundidade – Figura 1B) demonstra que o conteúdo de P nesta camada é o atributo com maior heterogeneidade, tanto nos momentos positivos (q = 0 a q = 5) e negativos (q = 0 a q = -5). Neste caso, como a adubação de plantio é realizada nos sulcos em profundidade de 0,3m, mais uma vez é possível evidenciar como o manejo aplicado à cultura da cana-de-açúcar interfere na multifractalidade dos atributos do solo. Os demais atributos medidos na camada de 0,2-0,4m de profundidade (MO, pH, K, Ca, Na, SB, CTC e V%) apresentaram comportamento similar entre si, tendendo a uma reta, ou seja, tendendo a uma monoescala.

Os gráficos do espectro de singularidade apresentaram comportamento multifractal para os atributos de P, K, Mg e Na na profundidade de 0-0,2m (Figura 2A). O comportamento dos demais atributos coincidiu com o comportamento da dimensão generalizada (Figura 1).

Os espectros de singularidade na camada de 0,2-0,4m (Figura 2B), demonstraram que o Mg, P e Ca são os atributos com maior grau de multifractalidade. O conteúdo de P na camada de 0,2-0,4m possui espectro de singularidade com elevada amplitude e baixa largura de espectro. O conteúdo de MO e Ca possuem espectro alongado para a direita com baixa amplitude e largura. O pH, K, Na, SB e CTC apresentaram espectros reduzidos, todavia, indicando tendência multifractal. O espectro de singularidade para o V% (Figura 2B) representa um sistema monofractal.

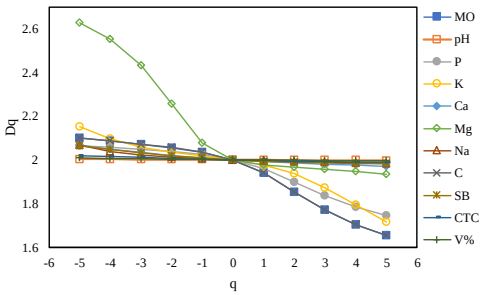
Tabela 2 - Parâmetros multifractais dos atributos do solo na profundidade de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m

0-0,2 m													
Atributos	Δf	Δf_{max}	Δf_{min}	α_{max}	α_{min}	Δα	f(0)-f(-1)	f(0)-f(1)	α(0)-α(-1)	α(0)-α(1)	D_0	D_1	D_2
MO	0,90	1,11	0,25	2,17	1,48	0,68	0,01	0,06	-0,041	0,10	2,00	1,94	1,85
pH	0,17	-0,09	-0,26	1,80	1,99	-0,18	-0,01	-0,01	0,03	-0,02	2,00	1,95	1,96
P	0,77	0,86	0,11	2,10	1,61	0,48	0,01	0,04	-0,02	0,07	2,00	1,96	1,89
K	-0,01	1,64	1,67	2,51	1,43	1,07	0,01	0,02	-0,02	0,04	2,00	1,97	1,93
Ca	-0,32	0,12	0,44	2,17	1,94	0,22	0,01	0,00	-0,02	0,01	2,00	1,99	1,98
Mg	-0,86	0,32	1,02	2,99	1,87	1,11	0,18	0,02	-0,30	0,06	1,99	1,97	1,96
Na	-0,94	0,06	1,00	2,28	1,97	0,30	0,00	0,00	-0,01	0,00	2,00	1,99	1,99
SB	-0,43	0,04	0,47	2,17	1,97	0,20	0,01	0,00	-0,01	0,01	2,00	1,99	1,98
CTC	-0,07	0,04	0,11	2,04	1,98	0,06	0,00	0,00	-0,00	0,00	2,00	1,99	1,99
V%	-0,04	0,01	0,05	2,02	1,99	0,02	0,00	0,00	-0,00	0,00	2,00	2,00	1,99
0,2-0,4 m													
MO	-0,36	0,16	0,52	2,21	1,93	0,28	0,01	0,01	-0,03	0,02	2,00	1,98	1,97
pH	-0,003	0,004	0,007	2,00	1,99	0,004	0,00	0,00	-0,00	0,00	2,00	2,00	1,99
P	0,44	0,62	0,11	2,54	1,59	0,95	0,16	0,10	-0,32	0,21	1,98	1,87	1,79
K	-0,01	0,06	0,07	2,03	1,97	0,06	0,00	0,00	-0,00	0,00	2,00	1,99	1,99
Ca	-0,26	0,06	0,33	2,13	1,96	0,17	0,01	0,00	-0,02	0,01	2,00	1,99	1,98
Mg	0,89	0,34	1,23	2,93	1,88	1,05	0,01	0,01	-0,03	0,02	2,00	1,99	1,97
Na	-0,005	0,06	0,06	2,02	1,97	0,05	0,00	0,00	-0,00	0,00	2,00	1,99	1,99
SB	0,01	0,14	0,12	2,05	1,95	0,09	0,00	0,00	-0,00	0,00	2,00	1,99	1,99
CTC	-0,03	0,01	0,07	2,02	1,98	0,04	0,00	0,00	-0,00	0,00	2,00	1,99	1,99
V%	-0,008	0,008	0,01	2,00	1,99	0,01	0,00	0,00	-0,00	0,00	2,00	2,00	1,99

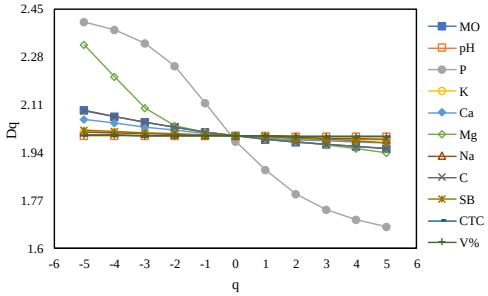
Fonte: Elaboração própria (2019)

Figura 1 - Dimensão generalizada para os atributos químicos na área de estudo. A. 0-0,2 m e B. 0,2-0,4 m

A.



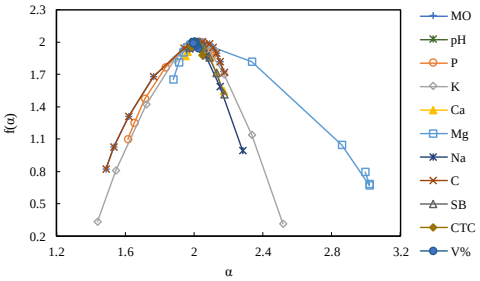
B.



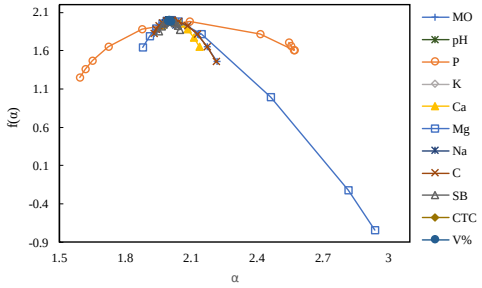
Fonte: Elaboração própria (2019)

Figura 2 - Espectro de singularidade para os atributos químicos na área de estudo. A. 0-0,2 m e B. 0,2-0,4 m

A.



B.



Fonte: Elaboração própria (2019)

O Mg foi o elemento que apresentou maior assimetria do ramo direito, indicando que há domínios de valores baixos dentro da distribuição dos dados para as duas profundidades em estudo. Por outro, o P obteve maior amplitude do espectro, destacando assim, uma maior heterogeneidade nos índices de escalas, principalmente na profundidade 0,2-0,4m. A amplitude do espectro de singularidade é indicativo de multifractalidade ou heterogeneidade de uma variável (Paz Ferreiro et al., 2018; Siqueira et al., 2018). Marinho et al. (2017) avaliando conteúdo de carbono em diferentes usos do solo determinaram diferentes graus de multifractalidade para as variáveis, e diferente assimetria de ramos do espectro de singularidade, sendo o conteúdo de carbono em floresta nativa o mais heterogêneo em relação a cultivo de cana-de-açúcar, diferenciando padrões de distribuição de conteúdo de carbono no solo, podendo ser usado para avaliar qualidade do solo. Siqueira et al. (2018) estudando a multifractalidade de atributos químicos do solo em cultivo de cana-de-açúcar em transectos verificaram multifractalidade para os atributos de CO, P, Ca, Mg, K, CTC, SB e H+Al em múltiplas escalas, apenas o pH do solo obteve tendência monofractal.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O manejo do solo na área de estudo influenciou principalmente o conteúdo de MO na camada de 0-0,2 m e de P na camada de 0,2-0,4 m de profundidade, e o conteúdo de Mg nas duas profundidades em estudo.

A multifractalidade dos atributos químicos do solo em estudo evidenciou maior heterogeneidade de escala para os atributos na camada superficial, quando comparada a camada subsuperficial.

O gráfico do espectro de singularidade para o V% representou uma monoescala ou um sistema monofractal.

REFERÊNCIAS

ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T.; FREITAS, R.M.; AGUIAR, D.A.; SUGAWARA, L.M.; MELLO, M.P. Remote Sensing Time Series to Evaluate Direct Land Use Change of Recent Expanded Sugarcane Crop in Brazil. **Sustainability**, n. 4, v. 4, p. 574-585, 2012.

ANAYA, C.A.; SANNWALD, E.H. Long-term soil organic carbon and nitrogen dynamics after conversion of tropical forest to traditional sugarcane agriculture in East México. **Soil & Tillage Research,** v. 147, p. 20-29, 2015.

BERTOLANI, F.C.; VIEIRA, S.R. Variabilidade especial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 987-995, 2001.

BANERJEE, S., Y.; X. GUO.; B.C. SI. Spatial relationships between leaf area index and topographic factors in a semiarid grassland Joint multifractal analysis. Australian Journal of Crop Science, n. 6, p. 756-763.

BERTOL I.; J. SCHICK.; D.H. BANDEIRA.; PAZ J. F.; VÁZQUEZ, E. V. Multifractal and joint multifractal analysis of water and soil losses from erosion plots: a case study under subtropical conditions in Santa Catarina highlands, Brazil. **Geoderma,** v. 287, p. 116-125, 2017.

BOLFE, E. L. **Banco de Dados Geoespaciais do Macrozoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Maranhão.** Relatório Técnico. 2012

BRASIL. **Decreto n. 4.297, de 10 de julho de 2002**. Estabelece critérios para o Zoneamento EcológicoEconômico do Brasil - ZEE, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4297.htm Acesso em: 10 mar. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Diretrizes Metodológicas para o Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil.** 3. ed. Brasília, DF: MMA/SEDR/PZEE, 2006. Disponível em: http://www.mma.gov.br/gestaoterritorial/zoneamento-territorial/item/7529. Acesso em: 5 mar. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **MacroZEE da Amazônia Legal.** 2008. Disponível em: http://www.mma.gov.br/gestao-territorial/zoneamento-territorial/macrozee-da-amaz%C3%B4nia-legal. Acesso em: 13 mar. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Zoneamento Ecológico-Econômico**. 2013. Disponível em: http://www.mma.gov.br/gestao-territorial/zoneamento-territorial. Acesso em: 10 mar. 2018.

CANIEGO, F. J.; J.J. IBÁÑEZ.; F.; MARTÍNEZ, San José. Selfsimilarity of pedotaxa distributions at the planetary scale: a multifractal approach. **Geoderma**, v. 134, p. 306-317, 2006.

CASTELLANO, M. K.; MUELLER., D.; SAWYER, J.; SIX, J. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization and the carbon saturation concept. **Global Change Biology,** p. 3200-3209, 2015.

Companhia Nacional de Abastecimento- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira:** cana-de-açúcar. Brasília-DF, v.4.Safra 2017/18. p.1-73, 2017.

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.

CARVALHO, J.R.P.; ASSAD, E.D. **Análise da precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.2, p.377-384, 2005.

CHERUBIN M.R.; KARLEN, D.L.; FRANCO, A.L.C.; TORMENA, C.A.; CERRI, C.E.P.; DAVIES, C.A.; CERRI, C.C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, n. 267, p. 156-168, 2016.

DIXON. R.K.; SOLOMON, A.M.; BROWN, S.; HOUGHTON, R.A.; TREXIER, M.C. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. **Science**, n. 263, p. 185-190, 1994.

DON, A.; SCHUMACHER, J.; FREIBAUER, A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis. **Global Change Biology,** n. 17, p. 1658-1670, 2011.

EBELING, A.G.; ANJOS, L.H.C. dos; PEREZ, D.V.; PEREIRA, M.G., GOMES, F.W.F. Atributos químicos, carbono orgânico e substâncias húmicas em Organossolos háplicos de várias regiões do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 325-336, 2011.

Embrapa Monitoramento por Satélite - EMBRAPA. **Macrozoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Maranhão**. 2014. Disponível em: http://www.cnpm.embrapa.br/projetos/macrozee/. Acesso em: 2 abr. 2018.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, EMBRAPA, 590 p. 2018.

FERREIRO P.; MARINHO, J. M. A.; ABREU, C.A.; VÁZQUEZ E. V. Soil texture effects on multifractal behaviour of nitrogen adsorption and desorption isotherms. **Biosystems Enegineering**, v. 168, p. 121-132, 2018.

GOLDEN SOFTWARE. Surfer: User´s Guide (Versión 7.0). Golden, CO, EEUU. 679 p. 1999.

GOMES FP. **Curso de estatística experimental**. 14. ed. Piracicaba, Degaspari. 477 p. 2000.

GOUYET, J.F. Physics and Fractals Structure. Nova York: Springer. Hentschel, H.G.E. y I. Procaccia, 1983. **The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors.** Physica D: Nonlinear Phenomena, v. 8, p. 435-444. 1996.

GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 169-177, 2005.

HENGL T; DE JESUS J. M.; HEUVELINK, G.B.M.; RUIPEREZ M. G.; KILIBARDA M.; BLAGOTIĆ A. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. **PLoS ONE**, v. 12, n. 2, 2017.

HENGL, T.; JESUS, J.M.; MACMILLAN, R.A.; BATJES, N.H.; HEUVELINK, G.B.M.; RIBEIRO, E.; SAMUEL-ROSA, A.; KEMPEN, B.; LEENAARS, J.G.B.; WALSH, M.G. SoilGrids1km — Global Soil Information Based on Automated Mapping. **PLoS ONE**. San Francisco, v. 9, n. 8, 2014.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Síntese dos Estados. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ma/panorama. Acesso em: 18 ago. 2019

JORGE, A.C.L.; POSADAS, A.N.D.; NAKAMURA, R.; GUIMARÃES, M.F.; RODA, V.O.; CURMI, P. **Aplicações da técnica multifractal para caracterização de manejo de solo.** São Carlos: Embrapa, 2008.

LACLAU, P.B.; LACLAU, J.P. **Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil.** Field Crops Research, v. 114, p. 351–360, 2009.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma,** n. 123, p. 1-22, 2004.

LEIVA, J.O.R.; SILVA, R. A.; BUSS, R.N.; FRANÇA, V.L.; SOUZA, A.A.; SIQUEIRA, G. M.. Multifractal analysis of soil penetration resistance under sugarcane cultivation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, p. 538-544, 2019.

MARINHO, M.A.; PEREIRA, M.W.M..; E. V. VÁZQUEZ., M. Lado., A. Paz González, 2017. Depth distribution of soil organic carbon in an Oxisol under different land uses: Stratification indices and multifractal analysis. **Geoderma**, v. 287, p. 126-134.

MEERSMANS, J.; WESEMAEL, B. VAN; RIDDER, F.E; MOLLE, M.VAN. Modelling the three-dimensional spatial distribution of soil organic carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium). **Geoderma,** v. 152: 43-52, 2009.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2 ed. Lavras: UFLA, 2006.

NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon, and organic matter.

In: BLACK, C.A. **Methods of soil analysis**. Chemical methods. Madison, Soil Science of America and American Society of Agronomy, p.961-1010, 1996.

PARIZZI, T.N.T. **Modelagem para predição do carbono orgânico do solo em áreas naturais e antropizadas do Cerrado Brasileiro**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, 2017.

RABBI, S.M.F.; TIGHE, M.; COWIE, A.; WILSON, B.R.; SCHWENKE, G.; MCLEOD, M.; BADGERY, W.; BALDOCK, J.A. **The relationships between land uses, soil management practices, and soil carbon fractions in South Eastern Australia.** Agriculture, Ecosystem and Environment, v. 197, p. 41–52, 2014.

RABBI, S.M.F.; TIGHE, M.; DELGADO-BAQUERIZO, M.; COWIE, A.; ROBERTSON, F.; DALAL, R.; PAGE, K.; CRAWFORD, D.; WILSON, B.R.; SCHWENKE, G.; MCLEOD, M.; BADGERY, W.; DANG, Y.P.; BELL, M.; O'LEARY, G.; LIU, D.L.; BALDOCK, J. Climate and soil properties limit the positive effects of land use reversion on carbon storage in Eastern Australia. **Scientific Reports,** v. 5, 2015.

RAIJ, B.; VAN, J.C.; ANDRADE., H.; CANTARELLA, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solo tropicais.** Campinas: Instituto Agronômico, 285p, 2001.

ROSA, C.M.; CASTILHOS, R.M.V.; PAULLETO, A.; PILLON, C.N.; LEAL, O.A. Conteúdo de carbono orgânico em Planossolo Háplico sob sistemas de manejo do arroz irrigado. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 35, p. 1769-1776, 2011.

SAS. SAS Software. Version 9.1. Cary, North Carolina: SAS Institute Inc., 1999.

SIGNOR, D.; ZANI, C.F.; PALADINI, A.A.; DEON, M.D.I.; CERRI, C.E.O. Estoques de carbono e qualidade da matéria orgânica do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 38, p. 1402-1410, 2014.

SIQUEIRA, G.M.: VIEIRA, S.R.; CEDDIA, M.B. (2008). Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, v. 67, n. 1, p. 203-211.

SIQUEIRA, G.M.; SILVA, E.F.F.; VAZQUÉZ, E. V.; GONZÁLEZ, A. P. Multifractal and joint multifractal analysis of general soil properties and altitude along a transect. **Biosystems Engineering,** 168, 105-120, 2018.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEF, K.; OGLE, S.; MORAES, J.C.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. **Agronomie**, EDP Sciences, v. 22, n. 8, p. 755-775, 2002.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 937-944, 2004.

SOUZA, Z.M.; CERRI, D.G.P.; MAGALHÃES, P.S.G.; SIQUEIRA, D.S. Spatial variability of soil attributes and sugarcane yield in relation to topographic location. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, n. 14, p. 1250-1256, 2010.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. **Application of geoestatistics to spatial studies of soil properties.** Advances in Agronomy, Amsterdan, v. 38, p. 45-93, 1985.

UNITED NATIONS. **Department of Economic and Social Affairs, Population Division.** World Population Prospects: The 2015 Revision, World Population 2015 Wallchart. ST/ESA/SER.A/378. 2015.

VAN DER WERF, G.R.; MORTON, D.C.; DEFRIES, R.S. CO2 emissions from forest loss. **Nature Geoscience** v. 2, p. 737-738, 2009.

VÁZQUEZ, E. V.; BERTOL I.; SIQUEIRA, G.M.; FERREIRO, J. P.; DAFONTE J., 2010. Evolution of the soil surface roughness using geostatistical analysis. **Bragantia,** v. 69, p. 141-152.

VÁZQUEZ, E. V.; CAMARGO; O.A.; VIEIRA, S.R.; MIRANDA, J.G.V.; MENK, J.R.F.; SIQUEIRA, G.M.; MIRÁS-AVALOS, J.M.; GONZÁLEZ, A. P. Multifractal analysis of soil properties along two perpendicular transects. **Vadose Zone Journal,** 12, 1-13, 2013.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ, V.H., SCHAEFER, G.R. (ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, 2000. p. 1-54.

VIEIRA, S.R.; PAZ GONZÁLEZ, A. **Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots.** Bragantia, Campinas, v. 62, n.1, p. 127-138, 2003.

WARRICK, A. W. **Spatial variability of soil physical properties in the field.** Application of soil physics. D. Hillel. p.319-344, 1980.

WIESMEIER, M.; HÜBNER, R.; BARTHOLD, F.; SPÖRLEIN, P.; GEUß, U.; HANGEN, E.; REISCHL, A.; SCHILLING, B.; VON LÜTZOW, M.; KÖGEL-KNABNER, I. **Amount, distribution and driving factors of soil organic carbon and nitrogen in cropland and grassland soils of southeast Germany (Bavaria)**. Agriculture, Ecosystems and Environment, v. 176, p. 39– 52, 2013.

YAKIMOV, B.N.; GELASHVILI, D.B.; ZHANG Y.; MARKELOV, I.N.; ZHANG, S.; MA, K. Quantification of non-power-law diversity scaling with local multifractal Analysis. **Ecological Informatics**, v. 48, p. 48-59, 2018.

ZELARAYÁN, M.L.C.; CELENTANO, D.; OLIVEIRA, E.C.; TRIANA, S.P.; SODRÉ, D.N.; MUCHAVISOY, K.H.M.; ROUSSEAU, G.X**.** Impacto da degradação sobre o estoque total de carbono de florestas ripárias na Amazônia Oriental, Brasil**. Acta Amazônica**, v. 45, n. 3, p. 271-282, 2015.