



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

LAURA VICTORIA MÁRQUEZ CATAÑO

MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM ÁREA DE JAZIDA DE FÓSFORO E  
URÂNIO NO SEMIARIDO BRASILEIRO

FORTALEZA – CEARÁ

2018

LAURA VICTORIA MÁRQUEZ CATAÑO

MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM ÁREA DE JAZIDA DE FÓSFORO E  
URÂNIO NO SEMIARIDO BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Química, Fertilidade e Biologia do solo.

Orientador: Profa. Dra. Maria Eugenia Ortiz Escobar.

FORTALEZA – CEARÁ

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M1m MÁRQUEZ CATAÑO, LAURA VICTORIA.  
MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM ÁREA DE JAZIDA DE FÓSFORO E URÂNIO NO  
SEMIARIDO BRASILEIRO / LAURA VICTORIA MÁRQUEZ CATAÑO. – 2018.  
58 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias,  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2018.

Orientação: Profa. Dra. Maria Eugenia Ortiz Escobar. |

1. Semiárido. 2. Proteína do solo relacionada à glomalina (PSRG). 3. Fracionamento físico. 4. Matéria orgânica particulada (MOP). 5. Matéria orgânica associada a minerais (MAM). I. Título.

CDD 631.4

---

LAURA VICTORIA MÁRQUEZ CATAÑO

MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM ÁREA DE JAZIDA DE FÓSFORO E  
URÂNIO NO SEMIARIDO BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do título de Mestre. Área de concentração Química, Fertilidade e Biologia do Solo.

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Maria Eugenia Ortiz Escobar – D. Sc. (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará- UFC

---

Prof. Sâmia Paiva de Oliveira – D. Sc.  
Instituto Federal do Ceará – IFCE

---

Prof. Teógenes Senna de Oliveira – D. Sc.  
Universidade Federal de Viçosa – UFV

*“(...) as artes, ciências e todos os ofícios são considerados como adoração, o homem que faz uma folha de papel com o máximo da sua habilidade, conscienciosamente, concentrando toda sua eficiência em aperfeiçoá-la, está louvando a Deus. Em poucas palavras, todo esforço, toda função desempenhada pelo homem, de todo coração, se for movida pelos mais nobres propósitos e pelo desejo de servir à humanidade, é adoração. Isto é adoração: servir a humanidade e suprir as necessidades do povo.”*

*Abdu'l-Bahá*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao departamento de Ciências do Solo pela oportunidade de fazer este curso de pós-graduação e por abrir as portas a estudantes estrangeiros.

A cada um dos professores pelos ensinamentos, ao pessoal da secretaria administrativa e acadêmica por todo o apoio logístico e aos técnicos de laboratório e o pessoal da FUNCEME pelos ensinamentos práticos.

A minha orientadora, professora Maria Eugenia Ortiz Escobar por suas orientações técnicas, por sua alegria e carinho, e sua firmeza ao mostrar que o mundo é maior do que a gente vê ao nosso redor.

Aos Professores Teógenes Senna de Oliveira e Sâmia Paiva de Oliveira, pelas orientações e sugestões técnicas.

A Cleyton Saialy Cunha pela iniciativa de trabalhar nesta área e pelas dicas e recomendações.

Ao CNPq pelo apoio econômico conferido ao longo deste processo.

Ao professor Raúl Darío Zapata Hernández, quem me guiou na graduação, transmitindo seu conhecimento, me ensinando a importância de ser crítico e ser ético, e por ter-me motivado a fazer pós-graduação.

A minha família pelo apoio e carinho constantes, incessantes, incondicionais.

A Acrísio Feitosa, Marlizia Oliveira e Fernando Bernardes por me amparar nos momentos de medo e por me ensinarem sua cultura e compreensão da vida.

A Luna Issakhany, Pedro Arturo Rojas e Marissa e Shoghi Andrade, por clarear o caminho quando parecia escuro, por me ensinar uma nova perspectiva da vida.

A meus amigos-irmãos bolsistas da OEA, pela alegria que me contagiaram, por tantos momentos inolvidáveis.

A meus amigos da UFV, pela alegria, a amizade, o carinho, as reflexões da vida e por me encorajarem sempre.

Ao professor Ivo Ribeiro, graças a quem tive o primeiro contato com o trabalho de pesquisa em laboratório e inculcou a constante leitura de artigos científicos com sentido crítico. E ao pessoal do LIE por me mostrarem a importância de fazer um trabalho de laboratório limpo, planejado, visando a obtenção de dados confiáveis, caprichando em cada tarefa cotidiana.

A Igor Castro pela amizade e o apoio técnico-prático incondicionais.

A cada pessoa com quem interagi porque cada um me influenciou com sua forma de agir ou de pensar, cada pequeno ato gera um impacto que muitas vezes nem percebemos.

Para resumir, Graças a Deus por me pôr no caminho de pessoas maravilhosas para encarar os desafios que Ele inventa!

“Recent analytical and experimental advances have demonstrated that molecular structure alone does not control SOM stability: in fact, environmental and biological controls predominate” (SCHMIDT *et al.*, 2011)

## RESUMO

A matéria orgânica do solo (MOS) é importante do ponto de vista da química ambiental por sua influência na mobilidade de metais pesados e por ser a maior reserva de carbono (C) nos ecossistemas terrestres. Fatores bióticos e abióticos influenciam os teores de MOS como os resíduos vegetais, os exsudados microbianos, a disponibilidade de nutrientes, a mineralogia, a granulometria, a agregação do solo, entre outros. A jazida fósforo-uranífera de Itataia, localizada no semiárido brasileiro é considerada o maior depósito de urânio da América do Sul e ainda está conservada sob vegetação nativa. Dados prévios indicam teores variáveis de metais pesados e teores de Carbono Orgânico Total (COT) comparativamente altos aos da região. Assim, objetivou-se caracterizar a matéria orgânica do solo nas condições de equilíbrio natural em uma jazida fósforo uranífera. Em 52 amostras do solo da área da jazida (prof = 0-10 cm) foram determinados os teores de COT, Nitrogênio Total (NT), proteína do solo relacionada à glomalina (PSRG), C e N da Matéria Orgânica Associada a Minerais e Particulada (C-MAM, N-MAM, C-MOP, N-MOP). Os resultados mostraram que as médias dos teores PSRG, COT e NT foram maiores do que os relatados para a região (4,7, 24,5 e 2,0 mg g<sup>-1</sup> respectivamente) e apresentaram alta correlação positiva. A MAM estabiliza 60% do COT e 78% do NT e apresentou C/N relativamente homogênea ao longo da área. Foram realizadas análises de correlações dos parâmetros orgânicos com dados prévios do mesmo solo. A C/N-MAM apresentou correlações com os metais Cr, Mo, V e Pb. Os teores de Ca e P total apresentaram relações com a %C-MAM. Não se evidenciaram correlações dos teores semitotais de urânio com os teores de COT, NT nem PSRG. Este é o primeiro reporte de PSRG em um solo uranífero. As altas correlações positivas entre PSRG e os teores de C e N nos compartimentos orgânicos, corroboram que os fatores envolvidos na acumulação de MOS também estimulam a propagação de fungos micorrízicos aumentando assim as concentrações de PSRG e concomitantemente de COT. Os resultados convidam a reconsiderar o paradigma de que os semiáridos têm pouco potencial de acúmulo de MOS.

**Palavras chave:** Semiárido, proteína do solo relacionada à glomalina (PSRG), fracionamento físico, matéria orgânica associada a minerais (MAM), matéria orgânica particulada (MOP).

## ABSTRACT

Soil organic matter (SOM) is relevant in environmental chemistry of soils, due to its ability to interact with heavy metals influencing its mobility, and is also considered the largest carbon pool in terrestrial ecosystems. Several biotic and abiotic factors influence the SOM content, such as plant residues and microbial exudates, nutrient availability, particle size, mineralogy and soil structure. The Itataia phosphate-uranium deposit located in the Brazilian semiarid is considered the largest uranium reservoir of South America and is still conserved under native caatinga biome. Varying levels of heavy metals have been previously reported in its soil, as well as higher total organic carbon (TOC) than expected. The present study was carried out aiming the characterization of soil organic matter in the natural equilibrium condition. TOC, Total Nitrogen (TN), glomalin related soil protein (GRSP), C and N from mineral associated organic matter (C-MAM, N-MAM) and from particulate organic matter (C-POM, N-POM) were measured in 52 simple soil samples from the first 10 cm depth. PSRG, TOC and NT mean values were higher than those reported for the region (4.7, 24.5 and 2.0 mg g<sup>-1</sup>, respectively) and were highly correlated. The MAM preserves 60% of the TOC and 78% of the NT and reach a relatively homogeneous C/N. Correlation analyses were performed with previous data from the same soil. C/N-MAM showed positive relations with the metals Cr, Mo, V and Pb. Particle size, Ca and total P content were related to the proportion of TOC that stabilizes in MAM. Uranium content presented no correlations with the TOC, TN or GRSP contents. This is the first study reporting GRSP from an uraniferous soil. High correlations between PSRG, and C and N contents of soil organic pools corroborate that factors involved in the accumulation of SOM also stimulate the propagation of mycorrhizal fungi increasing the concentrations of GRSP and simultaneously favoring the soil C stocks. The results invite to reconsider the paradigm of low SOM accumulation potential of semiarid soils.

**Keywords:** Semiarid, glomalin related soil protein (GRSP), physical fractionation, mineral associated organic matter (MAM), particulate organic matter (POM).

## LISTA DE ABREVIATURAS

As	Arsênio
C	Carbono
Cd	Cádmio
COT	Carbono orgânico total
C-MAM	Carbono da matéria orgânica associada a minerais.
C-MOP	Carbono da matéria orgânica particulada
Cr	Cromo
Fe	Ferro
FMA	Fungos micorrizicos arbusculares
MAM	Matéria orgânica associada a minerais
MO	Matéria orgânica
Mo	Molibdênio
MOP	Matéria orgânica particulada
MOS	Matéria orgânica do solo
N	Nitrogênio
Ni	Níquel
N-MAM	Nitrogênio da matéria orgânica associada a minerais
N-MOP	Nitrogênio da matéria orgânica particulada
Pb	Chumbo
PSRG	Proteína do solo relacionada à glomalina
Se	Selênio
U	Urânio
V	Vanádio

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Localização da área de estudo e malha de amostragem.....	23
Figura 2 -	Semivariogramas experimentais dos parâmetros COT, NT e PSRG.....	28
Figura 3 -	Semivariogramas experimentais dos parâmetros C-MAM, N-MAM, C-MOP e N-MOP.....	29
Figura 4 -	Comparação dos teores de COT do solo da área da jazida de Itataia e o COT reportado para solos sob vegetação nativa do semiárido brasileiro.....	31
Figura 5 -	Comparação do NT do solo da área da jazida de Itataia e o NT reportado para solos com vegetação nativa do semiárido brasileiro.....	32
Figura 6 -	Teores de CO, NT e C/N na área de estudo.....	33
Figura 7 -	Teores de PSRG do solo da área da jazida de Itataia comparados com o reportado para semiárido brasileiro.....	36
Figura 8 -	Distribuição do COT entre a fração MOP e MAM nas amostras do solo da área da jazida de Itataia.....	39
Figura 9 -	Distribuição do NT entre a fração MOP e MAM nas amostras do solo da área da jazida de Itataia. ....	39
Figura 10 -	Variação da razão C/N-solo entre as duas frações da MOS e sua independência com o teor de COT nas amostras de solo da jazida.....	40
Figura 11 -	Diagramas de dispersão e coeficientes de correlação de Pearson entre a razão C/N-solo e a C/N-MAM e C/N-MOP.....	41
Figura 12 -	Diagramas de dispersão e coeficientes de correlação de Pearson dos compartimentos de C e N do solo da área da jazida de Itataia.....	43
Figura 13 -	Diagrama de dispersão do Ca e a C/N-MAM.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva dos parâmetros COT, NT e C/N do solo ao longo da área da jazida.....	30
Tabela 2 - Teores de COT ( $\text{mg g}^{-1}$ ), NT ( $\text{mg g}^{-1}$ ) e C/N compilados de literatura sobre áreas nativas do semiárido brasileiro na camada de 0 a 10 cm.....	30
Tabela 3 - Estatística descritiva da PSRG do solo ao longo da área da jazida.....	34
Tabela 4 - Teores de PSRG reportados no semiárido brasileiro em diferentes usos de solo.....	35
Tabela 5 - Estatística descritiva dos parâmetros do fracionamento físico da matéria orgânica do solo da área da jazida .....	38
Tabela 6 - Cargas fatoriais do índice de reservatórios da MOS.....	44
Tabela 7 - Coeficientes de correlação de Spearman ( $r_s$ ) entre parâmetros orgânicos e granulometria, Ca, P e teores semitotais de metais pesados.....	45

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1	A matéria orgânica do solo.....	16
2.2	Estabilização da matéria orgânica do solo.....	17
2.3	Fracionamento granulométrico da matéria orgânica.....	18
2.4	Proteína do solo relacionada à glomalina.....	19
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1	Área de estúdio.....	21
3.2	Amostragem do solo e análises prévias.....	22
3.3	Análises de laboratório.....	23
3.3.1	Determinação de carbono orgânico e nitrogênio totais.....	23
3.3.2	Extração e quantificação da proteína do solo relacionada à glomalina.....	24
3.3.3	Fracionamento físico da matéria orgânica do solo.....	24
3.4	Análise estatística.....	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.1	Distribuição espacial de parâmetros orgânicos.....	28
4.2	Teores de carbono orgânico e nitrogênio totais.....	30
4.3	Proteína do Solo Relacionada à Glomalina.....	34
4.4	Fracionamento físico da matéria orgânica do solo.....	37
4.5	Síntese das relações dos parâmetros orgânicos.....	42
4.6	Relações da matéria orgânica do solo com a granulometria, Ca, P e metais pesados.....	45
5	CONCLUSÕES.....	49
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERENCIAS.....	51
	ANEXO 1.....	58

## 1 INTRODUÇÃO

A matéria orgânica do solo (MOS) tem sido amplamente reconhecida pelo seu papel na imobilização de metais pesados e por ser o maior reservatório ativo de carbono (C) do planeta. Porém, a dissolução da MOS pode provocar redistribuições dos metais associados a ela, representando um risco de contaminação de corpos de água além de emitir CO<sub>2</sub> à atmosfera. Em consequência, a quantificação e preservação da MOS são de interesse global.

Diversos fatores controlam a estabilidade da MOS, como, por exemplo a granulometria, a mineralogia, a qualidade dos resíduos vegetais, as comunidades microbianas, até mesmo compostos mais específicos como a proteína do solo relacionada a glomalina (PSRG), todos interagindo entre si e mantendo em equilíbrio os solos de ecossistemas naturais.

No estado do Ceará, encontra-se a jazida com maior concentração de urânio do Brasil, ainda preservada sob vegetação nativa da caatinga. Dados prévios reportam para o solo da área, teores variáveis de metais pesados e altos teores de carbono orgânico total (COT) em relação a outros solos do semiárido brasileiro.

Para o desenvolvimento das atividades de mineração, será preciso remover a vegetação. No entanto, é sabido que o revolvimento e a exposição do solo comprometerão a estabilidade da matéria orgânica e metais imobilizados nela. Por isso, surge a necessidade de estudar a MOS da área nas condições de equilíbrio natural.

O presente estudo visa caracterizar a MOS da área da jazida de Itataia, especificamente, quantificar o C e nitrogênio (N) nos compartimentos matéria orgânica particulada (MOP) e associada a minerais (MAM), quantificar a PSRG, avaliar a dependência espacial desses parâmetros orgânicos, e explorar correlações com a granulometria e os teores de Ca, P e metais pesados que foram determinadas em um estudo prévio.

Desta maneira serão obtidos níveis de referência de COT e NT e PSRG prévio às atividades de exploração, indispensáveis para futuros projetos de compensação ambiental, além de identificar fatores associados aos altos teores de COT que ocorrem naturalmente nesse solo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A matéria orgânica do solo

A matéria orgânica do solo (MOS) corresponde a todos os compostos orgânicos que se encontram no solo, incluindo a biota, os resíduos orgânicos de origem vegetal, animal e microbiano em diferentes graus de decomposição, assim como o material altamente decomposto geralmente chamado de húmus (LEHMANN e KLEBER, 2015).

A biota muitas vezes é chamada de matéria orgânica (MO) viva, representado aproximadamente 4% do C orgânico total do solo (COT) (SILVA e MENDONÇA, 2007) e corresponde às moléculas associadas às células de organismos vivos que se encontram temporariamente imobilizadas nos seus corpos, mas que apresentam potencial de mineralização. As raízes constituem entre 5% e 10% da MO viva do solo, a fauna entre 15% e 30% e os microrganismos entre 60% e 80%. Quando os microrganismos do solo são vistos como uma fração da MOS, estes são chamados de biomassa microbiana, fração que contém entre 1% e 3% do COT em solos tropicais (SILVA e MENDONÇA, 2007). Os resíduos orgânicos gerados pela biota são chamados de MO morta que contribui, em média, com 98% do COT. A MO morta é dividida em matéria macrorgânica (3-20%) e húmus (80%) (GREGORICH *et al.*, 2006).

Constantemente acontecem ganhos e perdas da MOS do sistema solo, já que este é um compartimento muito dinâmico (JANZEN, 2015). Os mecanismos de estabilização da MOS permitem sua preservação nos solos e o processo de mineralização provoca a liberação de nutrientes retidos. Assim, a MOS funciona como o principal reservatório de carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre, na maioria dos solos além de promover a liberação controlada de micronutrientes que se associam fortemente a ela, da mesma forma que a dissolução da MOS potencializa a solubilização de metais pesados e/ou contaminantes orgânicos.

Estima-se que a MOS contenha três vezes mais C do que a atmosfera ou a biota (JANZEN, 2004, SCHMIDT *et al.*, 2011), ou seja, o solo é um sistema aberto e a MOS tem sido entendida como um armazém de carbono com potencial de

reverter os incrementos de CO<sub>2</sub> atmosférico. Nos últimos anos os solos têm adquirido um grande protagonismo ambiental por conta disso.

Mesmo representando uma pequena proporção da massa total do solo, a MOS possui uma grande capacidade de interagir com outros componentes edáficos influenciando suas propriedades físicas, químicas e biológicas: Pela grande superfície específica e abundância de grupos funcionais diversos (hidroxila, carboxila, amida, fenol, e outros), a MOS tem a capacidade de ganhar prótons (H<sup>+</sup>) quando são abundantes em solução, ou perder prótons em meios alcalinos, assim sua carga superficial muda segundo as condições de pH (carga variável) (ZAPATA, 2014a). Com a distribuição de cargas por toda sua área superficial e a dissociação dos grupos hidroxila e carboxila, as cargas negativas da MOS podem contribuir muito com a capacidade de troca de cátions (CTC) do solo (SILVA e MENDONÇA, 2007). Além disso, sua capacidade de retirar e aportar H<sup>+</sup> à solução faz um efeito tampão no solo, impedindo mudanças bruscas de pH (ZAPATA, 2014a).

## **2.2 Estabilização da matéria orgânica do solo**

A natureza química do húmus tem sido discutida por muitos anos. No século passado, se sugeria que era formado por moléculas de grande complexidade química e grande peso molecular, originadas por reações bióticas e abióticas e que a essa complexidade se devia sua preservação ou estabilidade por longos períodos no solo. Várias rotas de formação foram propostas por pesquisadores, porém nunca se chegou a um consenso (ZAPATA, 2014a).

Nas últimas décadas, surgiu a hipótese de que esse tipo de substâncias complexas não existe (BURDON, 2001; SCHAEFFER *et al.*, 2015; LEHMANN e KLEBER, 2015) e foi proposto um modelo supramolecular que defende que o húmus corresponde a uma associação de moléculas simples e heterogêneas (peptídeos, açúcares, lipídeos) derivadas da decomposição biológica e estabilizadas por ligações fracas entre elas (PICCOLO, 2002). Assim, atualmente considera-se que a estrutura molecular não é o principal fator controlador da estabilidade da MOS e que há fatores ambientais e biológicos predominando (SCHMIDT *et al.*, 2011).

Os principais mecanismos que permitem a MOS resistir à mineralização completa são *i)* a formação de complexos com a matriz mineral do solo

(KÖGEL-KNABNER *et al.*, 2008; COTRUFO *et al.*, 2015), *ii*) a proteção física dentro dos agregados (SIX *et al.*, 2004) e *iii*) às limitações das taxas biológicas dos microrganismos (EKSCHMITT *et al.*, 2008).

Pelo exposto, a granulometria e a mineralogia influenciam a estabilidade da MOS. O teor de areia tem correlação negativa com o COT, enquanto a superfície específica da fração mineral e a CTC apresentam correlação positiva, assim como cátions bi e trivalentes (como  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Al}^{+3}$ ) que agem como agentes de cimentação e floculação. Os compostos orgânicos que contêm metais pesados adsorvidos são mais resistentes à biodegradação (HATTORI, 1996). De fato, Balabane *et al.* (1999) reportam a existência de uma proteção recíproca entre metais pesados e MOS que evita tanto a degradação da MOS quanto a mobilidade dos metais.

A cada vez se encontra mais evidencia de que o material peptídico é o material nitrogenado mais abundante na MOS e que o NT joga um papel chave na formação da MOS (KNICKER, 2011). Nesse sentido diversos autores sugerem que o balanço estequiométrico de elementos químicos tem grande influência nos processos de decomposição de resíduos e de estabilização de COT e NT no solo, processos que concomitantemente, são coordenados pelas comunidades microbianas (ZECHMEISTER-BOLTENSTERN *et al.* 2015).

Além do N, outros nutrientes são importantes para a formação de MOS. De fato, Tipping *et al.* (2016) relatam a existência de padrões estequiométricos da MOS nos solos do planeta classificando a MOS em dois grupos segundo sua estequiometria: MOS pobre em nutrientes, caracterizada por  $\text{C/N} \approx 25$  e  $\text{C/P} \approx 919$ , e a MOS rica em nutrientes com  $\text{C/N} \approx 8.4$  e  $\text{C/P} \approx 61$ . Assim, enriquecimentos em COT acontecem simultaneamente com aumentos em N e P orgânico nos solos, o que implica que a disponibilidade de nutrientes como N, P, S é crítica para a fixação de C na MOS (KIRKBY *et al.*, 2013).

### **2.3 Fracionamento granulométrico da matéria orgânica**

O estudo da MOS pode ser abordado a partir de sua compartimentalização em reservatórios com diferentes taxas de ciclagem e que têm relação com os mecanismos de estabilização do C no solo. Os métodos

granulométricos permitem separar os materiais macrorrgânicos presentes na fração tamanho areia, dando-lhes o nome de 'matéria orgânica particulada' (MOP). A MOP é constituída por restos vegetais e animais em vários estágios de decomposição e é uma fração não complexada com os minerais do solo. Dessa forma, pode estar livre *entre* os agregados do solo ou pode estar oclusa *dentro* dos agregados (GREGORICH *et al.*, 2006).

A outra fração separada com o método granulométrico corresponde aos materiais orgânicos que se encontra formando complexos com os minerais tamanho silte e argila, e é denominada 'Matéria Orgânica Associada aos Minerais' (MAM) (SILVA e MENDONÇA, 2007). As ligações químicas com os minerais conferem grande estabilidade à MAM já que impedem os ataques microbianos. Portanto esta fração tem uma taxa de ciclagem muito baixa; Balesdent (1996) sugere cerca de 63 anos para a metade do C associado a silte e argila ser substituído por C novo. A MAM corresponde ao que muitos autores chamam húmus (ROSCOE e MACHADO, 2002).

Assim, este método de fracionamento físico se baseia na importância das interações da MOS com a fase mineral do solo e permite a separação de reservatórios com diferentes estruturas e taxas de ciclagem. Por isso, esse método tem sido uma abordagem amplamente acolhida nas últimas décadas (ROSCOE e MACHADO, 2002, SIX *et al.*, 2004, KÖGEL-KNABNER *et al.*, 2008; COTRUFO *et al.*, 2015,).

#### **2.4 Proteína do solo relacionada à Glomalina**

O metabolismo microbiano tem sido sugerido como uma rota chave de formação da MOS (COTRUFO *et al.*, 2015, ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, 2015). De fato, as técnicas espectroscópicas e espectrométricas têm evidenciado que a composição química da MOS estável no solo se assemelha com compostos de origem microbiano, tanto materiais citoplasmáticos quanto exsudados (GLEIXNER, 2013).

Um exsudado reconhecido como grande contribuinte à formação da MOS é a glomalina (RILLIG *et al.*, 2001). Trata-se de uma glicoproteína abundante nos solos tropicais produzida por fungos micorrizícos arbusculares (FMA), e que tem sido reconhecida como uma fração orgânica altamente correlacionada com a

estabilidade dos agregados do solo (SINGH *et al.*, 2013). A alta estabilidade dos agregados garante proteção física da MOS intra-agregado, o que é importante para manter os estoques de carbono dos solos e mitigar emissões de CO<sub>2</sub> (SIX *et al.*, 2004).

A estrutura molecular da glomalina ainda não foi elucidada, mas é aceito que se trata de uma glicoproteína, ou seja, que é produto da expressão gênica dos FMA. Porém, no processo de extração do solo não se pode garantir que outras moléculas ou íons não sejam extraídos junto. Por isso, Rillig (2004), chama a atenção sobre o uso adequado da terminologia com relação à glomalina e sugere que o que é extraído operacionalmente nos laboratórios deve ser chamado de “proteína do solo relacionada à glomalina” - PSRG. A PSRG tem alta capacidade de sorver elementos da solução limitando sua mobilidade, incluindo metais pesados (VODNIK *et al.*, 2008). Estas observações sugerem que esta sorção representa um potencial da PSRG de estabilizar elementos tóxicos no solo.

O C e o N constituintes da PSRG podem atingir até 5% do COT e do NT em solos tropicais (RILLIG *et al.*, 2001). O teor de C da PSRG pode ser maior do que o C imobilizado na biomassa microbiana. Estas proporções revelam que esta glicoproteína pode ser uma fração quantitativa e qualitativamente importante dentro da MOS.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

O maciço de Santa Quitéria está situado no noroeste do estado do Ceará (Brasil), entre os municípios de Santa Quitéria e Itatira, a uma distância de 176 km da capital, Fortaleza. A classificação climática Köppen é BSw<sub>h</sub>. É uma região semiárida, com temperatura elevada, período chuvoso de fevereiro a abril e precipitação média, nos últimos 15 anos, de 327 mm (FUNCEME, 2017). Possui vegetação típica do bioma caatinga, com relevo montanhoso. A região é formada por rochas calcárias, calcárias magnesianas e dolomíticas, com alta presença de formas de dissolução cárstica. Em uma das zonas de carstificação, no sudeste de Santa Quitéria, as fissuras estão preenchidas por colofanito, rocha mineralizada que conforma a jazida fosforo-uranífera denominada Jazida de Itataia (RIMA, 2014).

Estima-se que esta jazida contenha quase 9 milhões de toneladas de fosfato e 80 mil toneladas de urânio (RIBEIRO *et al.*, 2008). As interações desse material parental com o relevo, as condições climáticas e os organismos vivos ao longo do tempo foram permitindo a formação de associações de solos complexas. Segundo Júnior (2012), são encontradas as seguintes classes de solo na região:

**Argissolos Vermelho-Amarelo:** Solos que apresentam horizonte B textural (Bt) imediatamente abaixo de horizonte A ou E, profundidade e textura variáveis, encontrados desde forte a imperfeitamente drenados. São ácidos a moderadamente ácidos com fertilidade natural média a alta (EMBRAPA, 2013). Na área de estudo, encontram-se em relevos ondulados a montanhoso, com saturação de bases igual ou superior a 50 % (Cunha, 2017). De acordo com Giongo *et al.* (2011) o teor médio de COT reportado para estes solos na caatinga é 8,9 mg g<sup>-1</sup>

**Luvisolos:** São solos com horizonte B textural (Bt) imediatamente abaixo do horizonte A fraco ou moderado ou horizonte E caracterizado por ser pouco espesso com cor avermelhada, usualmente com mudança textural abrupta, estruturas em blocos moderada a fortemente desenvolvida. São solos minerais pouco profundos ou rasos, não hidromórficos, com argila 2:2 de atividade alta e saturação de bases alta (EMBRAPA, 2013). No município estão exclusivamente nas áreas planas, suave

onduladas e onduladas (CUNHA, 2017). O teor médio de COT reportado para estes solos na caatinga é 11,8 mg g<sup>-1</sup> (GIONGO, *et al.*, 2011).

**Neossolos:** São solos pouco evoluídos compostos por material mineral, ou por material orgânico. Essa classe é mais abundante na região, podendo ser litólico, flúvico ou regolítico:

*Neossolos Litólicos:* Solos minerais, com espessuras inferiores a 50 cm, apresentam horizonte C, são de textura arenosa ou média geralmente cascalhenta, com drenagem de moderada a acentuada. O teor médio de COT reportado para estes solos na caatinga é 10,4 mg g<sup>-1</sup> (GIONGO, *et al.*, 2011).

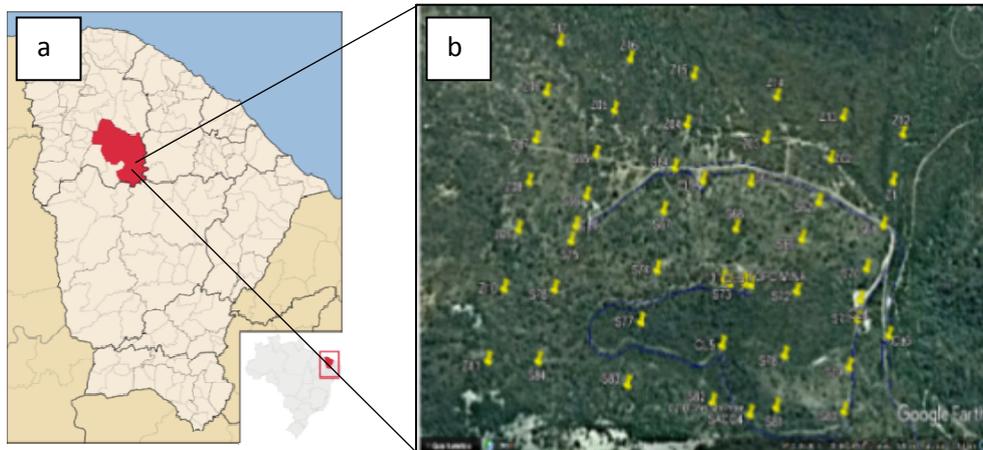
*Neossolos Flúvicos:* Solos com horizonte A diretamente sobre o horizonte C, são derivados de sedimentos aluviais apresentando-se pouco evoluídos, profundo a muito profundos às vezes com estratificação de camadas com caracteres morfológicos bem distintos ou em horizontes que não guardam relações genéticas entre si (EMBRAPA, 2013). Estes solos dominam nas áreas planas do município de preferência nas várzeas bordejando os cursos de água (CUNHA, 2017).

*Neossolos Regolíticos:* Solos com horizonte A sobrejacente a horizonte C ou Cr, admitindo horizonte Bi, geralmente arenosos e excessivamente drenados com alto teor de minerais primários intemperizáveis podendo ser encontrado com alta ou baixa fertilidade. (EMBRAPA, 2013). Na área se encontram tanto eutróficos quanto distróficos (saturação de bases inferior a 50%), todos em regiões planas e suaves onduladas. O teor médio de COT reportado para estes solos na caatinga é 4,9 mg g<sup>-1</sup> (GIONGO, *et al.*, 2011).

### 3.2 Amostragem do solo e análises prévias

As amostras foram coletadas entre maio e julho de 2015 para um estudo prévio. Foi realizada uma visita à área para reconhecimento e georreferenciamento dos pontos de amostragem. A coleta foi feita seguindo uma malha regular com 100 m de espaçamento, na camada de 0 a 10 cm, totalizando 52 amostras, abrangendo uma área aproximada de 154 ha (Figura 1). As amostras foram levadas para o Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, secas ao ar, moídas e passadas por peneiras de *nylon* com abertura de malha de 2 mm como o detalha Cunha *et al.* (2018).

Figura 1 - a) Localização da área de estudo; b) Malha de amostragem



Fonte: Elaborado pela autora a partir de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ceara\\_MesoMicroMunicip.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ceara_MesoMicroMunicip.svg)

### 3.3 Análises de laboratório

#### 3.3.1 Determinação de carbono orgânico e nitrogênio totais

Os teores de COT no solo foram determinados por combustão úmida, de acordo com a metodologia proposta por Yeomans e Bremner (1988) adaptada por Mendonça e Matos (2005). 0,5 g de solo moído (60 mesh) foram oxidados com 5 mL de dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$ )  $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ , a reação foi catalisada com 7 mL de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) 98% e foi levada a  $170^\circ \text{ C}$  no bloco digestor durante 30 minutos. Após esfriar até a temperatura ambiente, cada amostra foi titulada com sulfato ferroso amoniacal ( $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ )  $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ .

Os teores de NT do solo foram determinados segundo Bremner (1996). Para tanto, 0,5 g de solo moído (60 mesh) foram digeridos em 2 mL ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) 98% com adição de 0,5 g de mistura dos sais catalisadores sulfato de potássio e sulfato de cobre ( $K_2SO_4$  e  $CuSO_4$ ) em proporção 10:1. A digestão foi feita no bloco digestor elevando a temperatura lentamente até um máximo de  $350^\circ \text{ C}$ . Concluída esta etapa, as amostras foram reservadas até atingir temperatura ambiente e se procedeu à destilação Kjeldahl, coletando o destilado em 15 mL de mistura de ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) 2 % com solução indicadora. Para a quantificação, o destilado foi titulado em ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ )  $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ .

### 3.3.2 Extração e quantificação da proteína do solo relacionada à glomalina (PSRG)

A PSRG total foi extraída segundo Wright, *et al.* (2006). Para 1 g de solo foram adicionados 8 mL de pirofosfato de sódio ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ )  $0,1 \text{ mmol L}^{-1}$  e ajustado a pH 9. Para garantir bom contato amostra-extrator foi feita agitação vórtex. Posteriormente as amostras foram autoclavadas a  $120^\circ\text{C}$  durante 60 minutos. Imediatamente após a autoclavagem, cada amostra foi centrifugada a 5000 rpm durante 10 minutos e foi coletado o sobrenadante. Para extrair a PSRG total foram necessários vários ciclos de extração até a cor do sobrenadante se tornar amarelo claro. Assim, a cada extração o sobrenadante coletado foi misturado com aquele da extração anterior.

A quantificação da proteína no extrato total foi realizada por variação de cor em reagente Bradford (BRADFORD, 1976) em espectrofotômetro no comprimento de onda de 595 nm, usando albumina sérica bovina (ASB) como padrão.

Para a preparação do reagente Bradford deve se usar corante azul de coomassie de boa qualidade e de referencia G-250 (existe o R-250 que não é adequado para quantificação de proteínas em solução). Após preparar o reagente Bradford, este foi filtrado (passagem lenta). Ele adquire cor marrom cristalino em condições ácidas e apresentou uma absorvância de  $\approx 0,300$  (espectrofotômetro no comprimento de onda de 595 nm).

### 3.3.3 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo.

Foram separadas as frações MOP e MAM segundo Cambardella e Elliott (1992). Partiu-se de 10 g de solo, que foram dispersados com 30 mL de hexametáfosfato de sódio ( $(\text{NaPO}_3)_6$ )  $5 \text{ g L}^{-1}$  em tubo de centrifuga de 50 ml contendo uma esfera de cristal de 1 cm de diâmetro para evitar a concentração da amostra no centro do tubo e garantir sua constante homogeneização. As amostras foram agitadas em agitador horizontal a 120 rpm durante 15 horas. Após essa dispersão química e física, o solo foi separado granulometricamente usando peneira

com abertura de malha de 53  $\mu\text{m}$  com ajuda de água destilada, originando assim as duas frações. A fração retida na peneira corresponde à MOP e aquela que passou pela peneira corresponde à MAM. A massa de cada fração foi determinada após secagem em estufa a 60°C. O C da MAM (C-MAM) foi quantificado por combustão úmida, a partir de 0,25 g seguindo a metodologia de Yeomans e Bremner (1988) adaptada por Mendonça e Matos (2005). O N da MAM (N-MAM) foi determinado a partir de 0,25 g segundo Bremner (1996).

Os teores de C e N foram obtidos em mg de MAM para cada g de MAM, portanto, depois foram expressados com base em g de solo. O C e N da MOP (C-MOP e N-MOP) foram determinados pela diferença entre o COT e o C-MAM e entre o NT e o N-MAM respectivamente.

### **3.4 Análise estatística**

Para cada amostra e em cada metodologia foram feitas três repetições. Os resultados foram analisados com uso de estatística descritiva. O teste de Kolmogorov-Smirnov foi aplicado às variáveis estudadas, concluindo que sua distribuição corresponde à distribuição normal, não requerendo transformações matemáticas para aplicação de técnicas de estatística paramétrica.

A análise de dependência espacial foi feita mediante a construção de semivariogramas experimentais no software Golden Surfer, versão 10.7.972.

A médias de COT, NT e PSRG da área foram comparados com as médias reportadas no semiárido brasileiro usando o teste T de Student após verificação de homogeneidade das variâncias mediante o teste F. As médias do semiárido brasileiro foram calculadas após extração de dados da literatura para a mesma profundidade.

A técnica de análise fatorial foi utilizada para redução de dimensionalidade formando uma variável latente. As correlações de Pearson e de Spearman foram exploradas entre as variáveis orgânicas (incluindo a variável latente) e os parâmetros físicos e químicos do mesmo solo determinados previamente por Cunha (2017).

O teste de normalidade, de homogeneidade de variâncias, a comparação de médias, as análises de correlação de Pearson e Spearman e a análise fatorial foram feitos no software R, versão 1.1.383.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Distribuição espacial de parâmetros orgânicos

Nas figuras 2 e 3 apresentam-se os semivariogramas experimentais das variáveis orgânicas. Como se observa, o efeito pepita é igual ao patamar em todas as distâncias avaliadas, o que significa que 100% da variação é aleatória, não havendo dependência espacial. Esse comportamento é denominado efeito pepita puro.

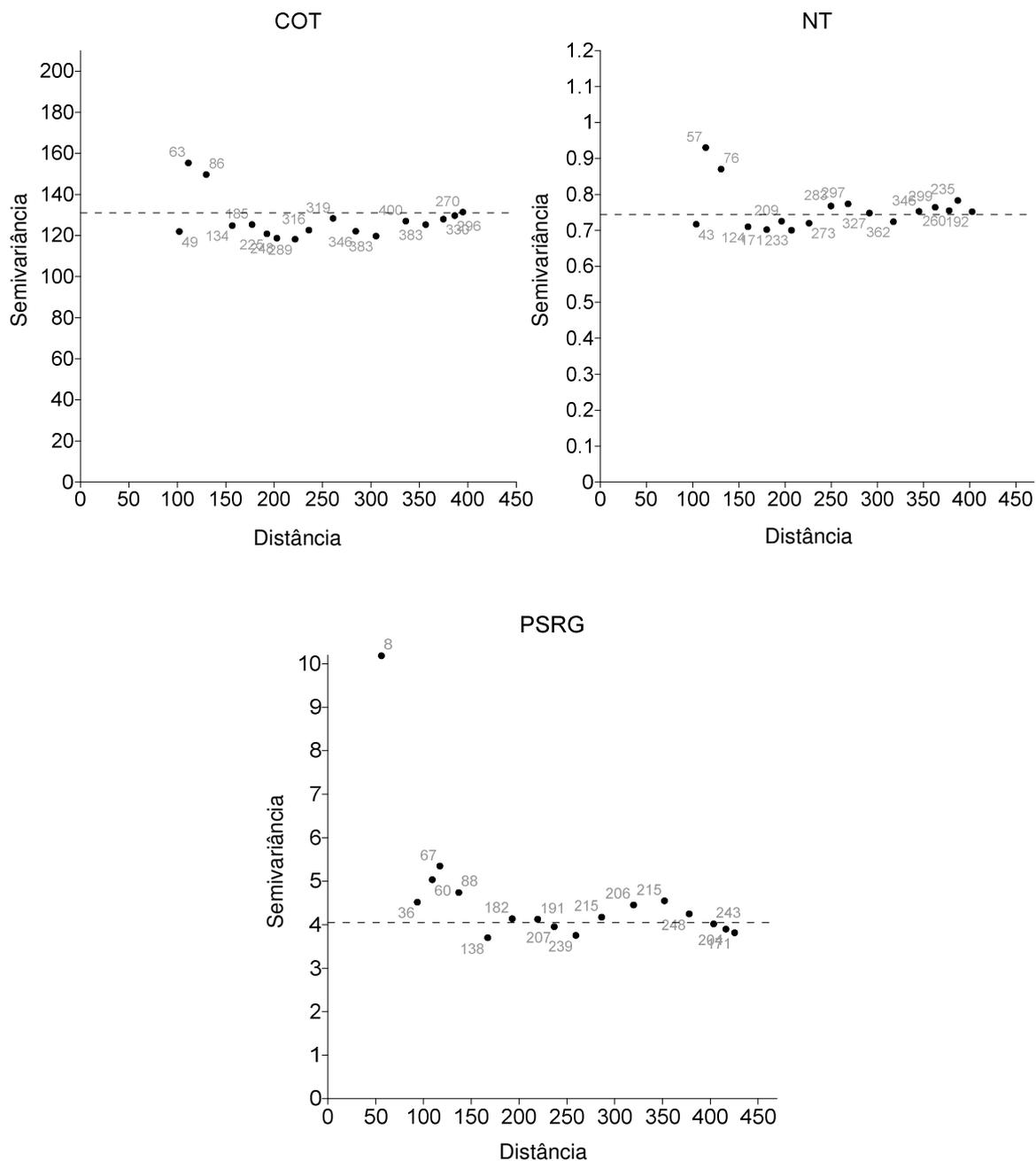
Também foi reportado efeito pepita puro para o COT em semiárido cearense por Barros de Melo *et al.* (2016) que geraram seu semivariograma a partir de 100 pontos. Webster e Oliver (2007) explicam que a partir de amostras de 100 pontos se obtêm estimativas de confiabilidade moderada e sugerem 400 amostras para conseguir variogramas de alta precisão.

De acordo com Cambardella e Karlen (1999) uma distância de amostragem de 15 m aumenta a precisão para capturar a variação espacial da MOS, mas os mesmos pesquisadores conseguiram bons modelos com pontos de amostragem a cada 60 m. Essa apreciação coincide com a baixa dependência espacial da MOS encontrada por Bogunovic *et al.* (2017b) com 2411 pontos a 250 m de espaçamento. Assim mesmo, Chen *et al.* (2016) com mais de 540 pontos de amostragem a uma distância entre 700 e 1100 m, e Bogunovic *et al.* (2017a) com 182 amostras a cada 100 metros detectaram moderada dependência espacial da MOS ou do COT.

Segundo Bogunovic *et al.* (2017a) o efeito pepita puro usualmente acontece como consequência de três motivos: *i)* O número de amostras é limitado, *ii)* A variação acontece em escala menor do que a distância de amostragem *iii)* A existência de *outliers* nos dados.

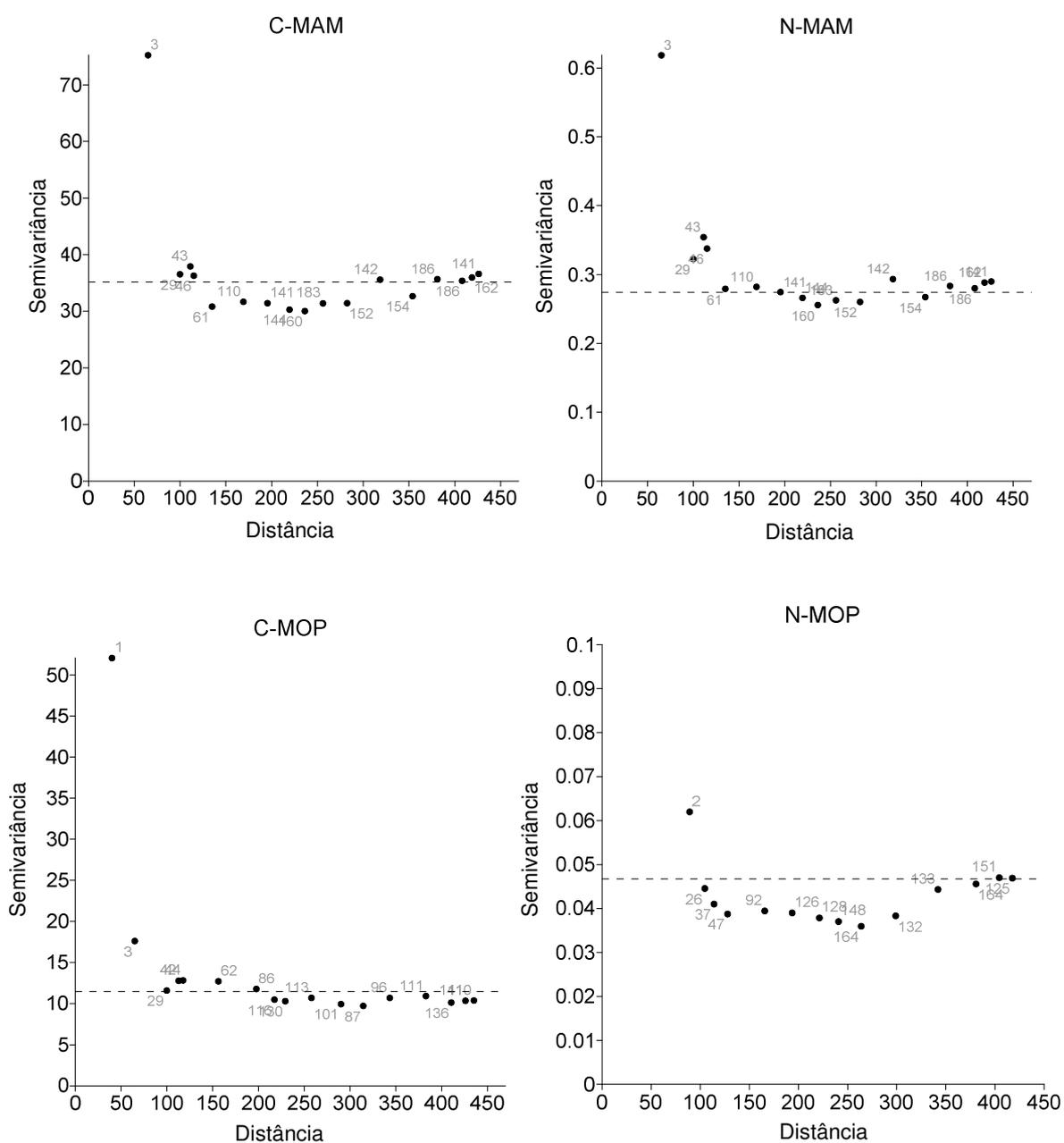
É possível que a dependência espacial dos parâmetros orgânicos no presente solo, se houver, aconteça em escala inferior a 100 m (distância de amostragem), ou que o número de amostras não tenha sido suficiente para capturar a variabilidade espacial. Já que não foi achada nenhuma estrutura espacial, os métodos tradicionais de estatística descritiva conseguem representar a área com precisão (MYERS, 2016).

Figura 2. Semivariogramas experimentais dos parâmetros COT, NT e PSRG.



Elaborado pela autora no software Surfer (versão 10.7.972).  
 As linhas descontinuas representam a variância total de cada variável.  
 O número sobre cada ponto é o número de pares usados para determinar a variância de cada distância.

Figura 3- Semivariogramas experimentais dos parâmetros C-MAM, N-MAM, C-MOP e N-MOP



Elaborado pela autora no software Surfer (versão 10.7.972).

As linhas descontinuas representam a variância total de cada variável.

O número sobre cada ponto é o número de pares usados para achar a variância de cada distância.

## 4.2 Teores de carbono orgânico e nitrogênio totais

Ao longo da área da jazida de Itataia o COT apresentou um valor médio de 24,46 mg g<sup>-1</sup> (tabela 1). O valor mínimo encontrado foi 7,12 mg g<sup>-1</sup> e o máximo de 59,42 mg g<sup>-1</sup>, com um coeficiente de variação de 47%.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos parâmetros COT, NT, C/N e do solo ao longo da área da jazida

	COT ----- mg g <sup>-1</sup> -----	NT	C/N
<b>Média</b>	24,46	2,01	14,89
<b>Desvio padrão</b>	11,58	0,89	2,07
<b>Mínimo</b>	7,12	0,60	8,93
<b>Máximo</b>	59,42	4,33	21,20
<b>Q1</b>	16,76	1,41	13,59
<b>Q3</b>	30,93	2,48	15,78

Fonte: Elaborado pela autora.

Esta ampla variação no teor de COT, se explica pela presença de diferentes tipos de solos na área (JÚNIOR, 2012). Chama a atenção que 40% das amostras da área apresentaram teores de COT superiores a 17,40 mg g<sup>-1</sup> (que equivale a 3% de MOS) o que é um valor alto para o semiárido brasileiro como pode se apreciar ao comparar com valores da tabela 2.

Tabela 2 – Teores de COT (mg g<sup>-1</sup>), NT (mg g<sup>-1</sup>) e C/N compilados de literatura sobre áreas nativas do semiárido brasileiro na camada de 0 a 10 cm.

COT mg g <sup>-1</sup>	NT mg g <sup>-1</sup>	C/N*	Fonte
5,60	0,60	10,9	Santana 2015
7,60	0,70	12,7	Santana 2015
8,40	0,60	16,3	Santana 2015
9,61	1,09	10,3	Silva 2015
10,00	0,70	16,7	Santana 2015
10,10	0,90	13,1	Santana 2015
10,59	NR	NR	Valbrun; <i>et al.</i> 2017
11,20	1,00	13,1	Santana 2015
14,00	1,00	16,3	Santana 2015
15,90	2,80	6,6	Duarte; <i>et al.</i> 2015
16,20	1,40	13,5	Santana 2015
16,63	NR	NR	Valbrun; <i>et al.</i> 2017
22,41	NR	NR	Lourenço; <i>et al.</i> , 2015
23,67	NR	NR	Nobre; <i>et al.</i> 2015
43,65	3,75	13,6	Fracetto; <i>et al.</i> 2012

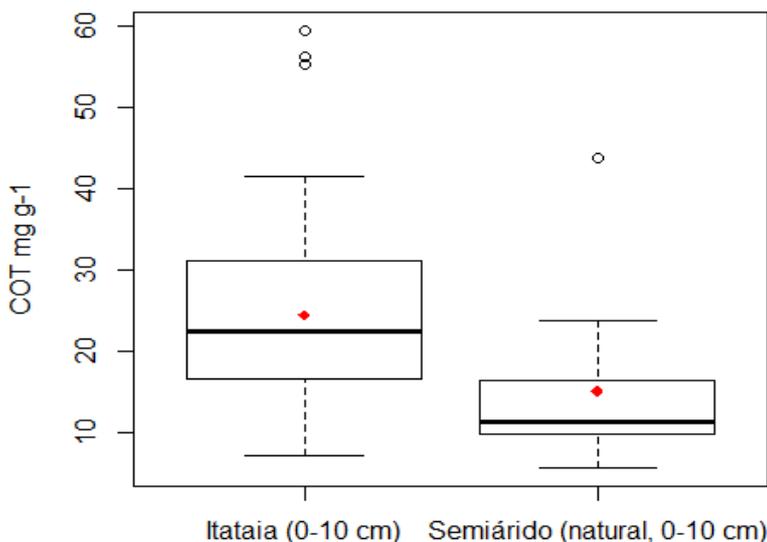
Fonte: Elaborado pela autora.

\*Razão molar C/N calculada com base no COT e no NT reportados em cada estudo.

NR: Não reportado

A média de COT dos estudos da tabela 2 é 15,04 ( $\pm 9.46$ )  $\text{mg g}^{-1}$ . A área da jazida de Itataia apresenta teores de COT superiores à média desses relatos da região ( $p\text{-value} = 0,002$ ) com um nível de confiança de 99%. A diferença das médias pode ser visualizada na figura 4.

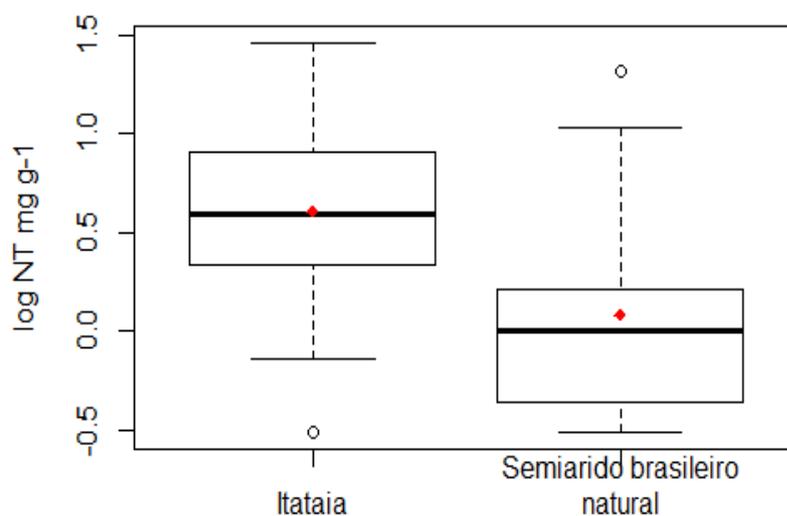
Figura 4 - Comparação dos teores de COT do solo da área da jazida de Itataia e o COT do semiárido brasileiro



Fonte: Elaborado pela autora.  
 Dados de Semiárido brasileiro em condições naturais na camada de 0 a 10 cm, extraídos da tabela 2,  $n=15$ .  
 As médias apresentaram diferença estatística significativa pelo test T ( $p\text{-value} < 0,01$ ) e foram ressaltadas com cor vermelho.

O teor de NT do solo da área da jazida tem média de 2,01  $\text{mg g}^{-1}$  (tabela 1) sendo também um valor mais alto do que o esperado para a área. Valores de NT reportados para áreas nativas do semiárido brasileiro (0-10 cm) recopilados na tabela 2 têm uma média de 1,32 ( $\pm 0.65$ )  $\text{mg g}^{-1}$ , apresentando assim diferença significativa com os teores de NT de Itataia para a mesma profundidade (Figura 5).

Figura 5 - Comparação do NT do solo da área da jazida de Itataia e o NT reportado no semiárido brasileiro



Fonte: Elaborado pela autora.

N do semiárido brasileiro tomados da tabela 2, n=11.

Foi necessário fazer transformação logarítmica para cumprir o requisito de normalidade. As médias apresentaram diferença estatística significativa pelo test T ( $p\text{-value} < 0,01$ ) e foram ressaltadas com cor vermelho.

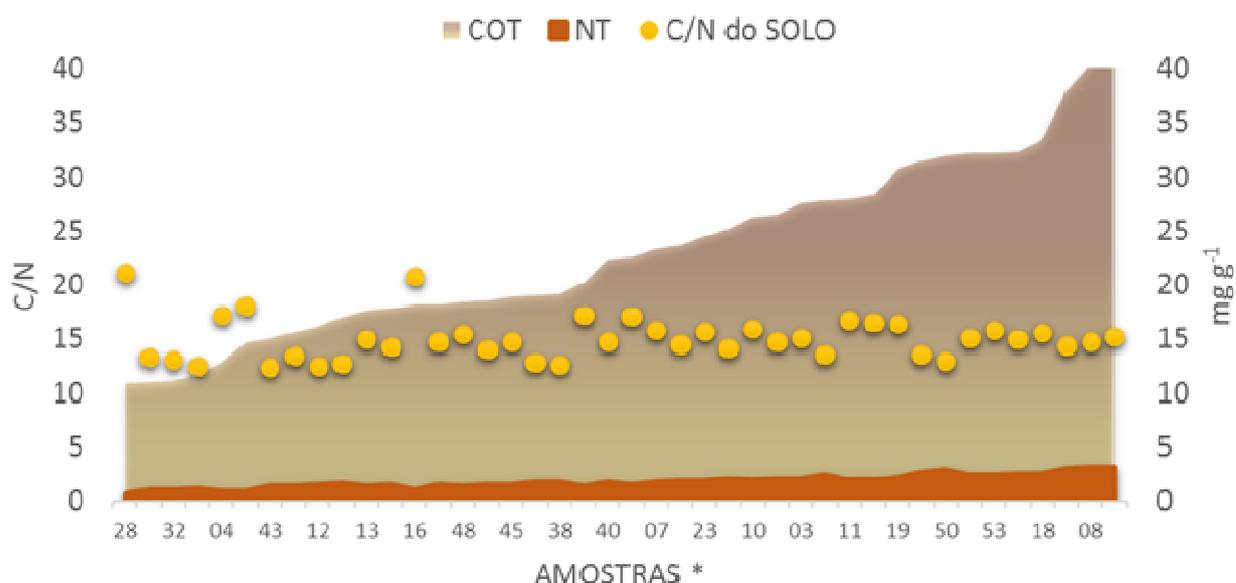
Os valores de NT ao longo da área de Itataia variam junto com os teores de COT, apresentando uma alta correlação positiva ( $p\text{-value} < 0,001$ ) com um coeficiente de correlação de Pearson de 0,96.

No solo da área da Jazida de Itataia a razão C/N teve uma média de 14,89 (tabela 1), não apresentando diferença estatística com a média de solos da região ( $13 \pm 2,98$ , tabela 2). Este valor também é semelhante ao relatado para solos ao redor do mundo: Thomsen *et al.* (2008) encontraram uma C/N de 9,3 a 23,3 (transformado a razão molar) em 37 solos arenosos na Alemanha, assim como Kirkby *et al.* (2011) quem compilaram estudos reportando relações C/N entre 11,4 e 20,4 (transformado a razão molar) em solos de diferentes texturas e regiões do mundo.

Uma relação positiva entre a razão C/N e o teor de COT com um  $R^2$  de 0,67 foi observada por Thomsen *et al.* (2008), indicando que solos com maiores teores de COT apresentaram menos N por unidade de C e pelo tanto baixa correlação entre COT e NT. À diferença deles, no solo da jazida de Itataia não foi observada correlação entre o COT e C/N ( $r=0,04$ ). Isto se deve a que os aumentos

de COT são fortemente acompanhados por aumentos de NT, permitindo uma relação C/N relativamente estável ao longo da área, como pode se observar na figura 6.

Figura 6 - Teores de CO, NT e C/N das amostras de solo na área de estudo



Fonte: Elaborado pela autora.

\*Amostras aparecem em ordem crescente de COT

Em síntese, o solo da área da jazida de Itataia apresenta teores de COT e NT maiores do que as médias encontradas na literatura sobre a região, e muito alta correlação entre estes dois parâmetros. Os altos teores de COT indicam que há mecanismos eficientes para estabilização do C aportado pela vegetação (principalmente na época de chuvas), a fauna e os microrganismos do solo. Além disso, o alto teor de P do solo pode causar maior imobilização do C e simultaneamente de N para atingir um balanço estequiométrico, obtendo assim uma razão molar C/N semelhante à reportada para solos em geral.

### 4.3 Proteína do solo relacionada à glomalina

Foram detectados teores de PSRG no solo da área da jazida, variando entre 0,3 e 11,6 mg g<sup>-1</sup>, com média de 4,73 mg g<sup>-1</sup> (Tabela 3). O presente estudo é o primeiro que investiga teores de PSRG em solos com altos conteúdos de urânio.

Tabela 3 - Estatística descritiva da PSRG ao longo da área da jazida

	<b>PSRG mg g<sup>-1</sup></b>
<b>Média</b>	4,73
<b>Desvio padrão</b>	2,04
<b>Mínimo</b>	0,34
<b>Máximo</b>	11,64
<b>Q1</b>	3,89
<b>Q3</b>	5,56

Fonte: Elaborado pela autora.

A primeira extração de glomalina em solos foi feita a partir do horizonte A de 12 solos diferentes nos Estados Unidos, no quais foram reportados valores entre 4,4 e 14,4 mg g<sup>-1</sup> (WRIGHT *et al.*, 1996). Em solos temperados e tropicais tem se observado valores oscilando entre 2 e 15 mg g<sup>-1</sup> (WANG *et al.*, 2018). Bird *et al.* (2002) encontraram teores entre 0,25 e 0,55 em solos do semiárido estadunidense. Em um núcleo de desertificação no Ceará, Silva (2015) reporta teores entre 0,18 e 0,83 mg g<sup>-1</sup>. Em termos gerais, têm sido reportados valores maiores de PSRG em solos sob vegetação nativa e menores valores em solos com uso intensificado.

Os valores obtidos no solo de Itataia foram comparados com dados de PSRG no semiárido brasileiro sob diversos sistemas de usos (Tabela 4). Não foi possível restringir esta comparação só a solos em condições nativas na camada de 0 a 10 cm devido à pouca quantidade de publicações disponíveis com essas especificações.

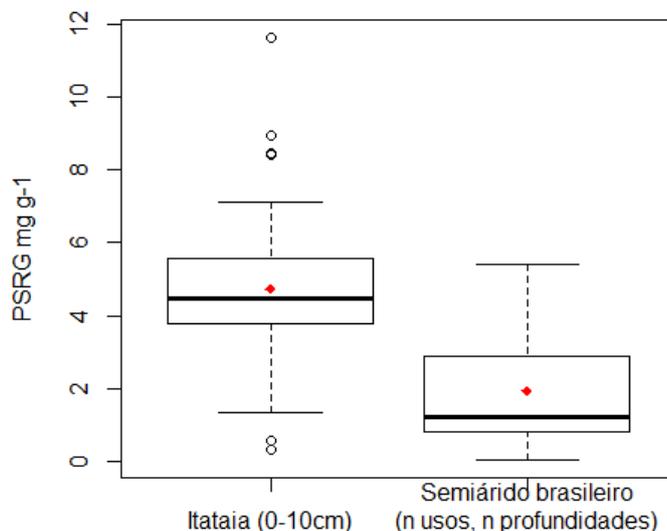
Tabela 4 – Teores de PSRG reportados no semiárido brasileiro em diferentes usos de solo.

<b>PSRG mg g<sup>-1</sup></b>	<b>Uso/Estado</b>	<b>Fonte</b>
0,04	Nativo	Nobre; <i>et al.</i> 2015
0,18	Pastejo	Silva 2015
0,44	Sucessão	Silva 2015
0,50	Agrícola	Souza 2009
0,83	Nativo	Silva 2015
0,83	Agrícola	Souza 2009
0,89	Agrícola	Souza 2009
0,92	Nativo	Souza 2009
1,13	Agrícola	Souza 2009
1,32	Nativo	Souza 2009
2,18	Pastejo	Souza 2009
2,25	Nativo	Souza 2009
2,78	Sucessão	Souza 2009
2,91	Sucessão	Souza 2009
3,50	Pastejo	Diniz 2011
3,70	Sucessão	Diniz 2011
5,20	Sucessão	Diniz 2011
5,40	Sucessão	Diniz 2011

Fonte: Elaborado pela autora.

Estes 18 reportes têm média 1,94 ( $\pm$  1.65), máximo 5,40 e mínimo 0,04. Mediante o teste T encontrou-se evidencia estatística significativa ( $p < 0.01$ ) para afirmar que a média de PSRG do solo da área da Jazida de Itataia é maior do que a média dos reportes consultados na literatura regional (Figura 7). Esses resultados indicam que o solo de Itataia contém FMAs adaptadas a essas condições específicas de altas concentrações de U, presença de metais pesados e seca marcada e que além disso são eficientes na produção de PSRG.

Figura 7 - Teores de PSRG do solo da área da jazida de Itataia comparados com teores reportados para semiárido brasileiro



Fonte: Elaborado pela autora.  
 Dados de Semiárido brasileiro extraídos da tabela 4.  
 As médias foram ressaltadas com cor vermelho e apresentaram diferença estatística significativa pelo test T ( $p\text{-value} < 0,01$ ).

Outros estudos já reportaram a presença de PSRG em solos com altos teores de metais pesados. Vodnik *et al.* (2008) em área de mineração de Pb, reportaram níveis de PSRG entre 3,3 e 67,1 com uma média de 23,4 mg g<sup>-1</sup>. Cornejo *et al.* (2008) reportam valores de PSGR entre 6,9 e 25,0 mg g<sup>-1</sup> em um solo com altos teores de Cu e Zn no semiárido chileno. Na China, Xu *et al.* (2012), reportaram valores entre 2,9 e 6,8 mg g<sup>-1</sup> em áreas de mineração de Pb e Zn, e observaram incrementos na PSRG com aumentos nos teores de metais pesados. Gonzáles-Chávez *et al.* (2009) reportaram níveis entre 0,6 e 4,7 mg g<sup>-1</sup> em uma pilha de rejeito de mineração com altos teores de Cd. Todos estes autores reconhecem a glomalina como uma glicoproteína com capacidade de sorver metais pesados, diminuindo sua mobilidade.

Roos e Jakobsen (2008) encontraram FMAs agindo como protetores das plantas de solos derivados de rocha fosfórica diminuindo a fitoextração de uranio e outros metais associados a este material parental. Neste sentido, a alta produção de PSRG neste solo pode ser um mecanismo das FMA para atenuar condições adversas do ambiente, como relatam Rillig *et al.* (2001), os quais sugerem que os

FMA secretam glomalina como uma estratégia para modificar o hábitat devido à sua influência na agregação do solo e para amenizar as condições químicas mediante a imobilização de metais pesados (GONZÁLEZ -CHÁVEZ *et al.*, 2009).

No solo da área da jazida foi detectada uma forte correlação positiva entre a PSRG e o COT ( $r = 0,92$ ,  $p < 0,001$ ). Resultados semelhantes foram reportados por Nichols e Wright (2005), Fokom *et al.* (2013) e Cardoso (2017), com  $r = 0,72$ ,  $0,84$ ,  $0,68$  respectivamente, tanto em solos sob vegetação natural quanto em cultivados.

Os valores de NT e PSRG do solo da jazida de Itataia também apresentaram alta correlação positiva com  $r = 0,90$  ( $p < 0,001$ ). Wang (2018) reporta correlação moderada altamente significativa com  $r = 0,51$  entre PSRG e NT enquanto Singh *et al.* (2016) obtiveram  $r = 0,95$ .

As altas correlações de COT, NT e PSRG do solo de Itataia, indicam que estão intimamente ligados e que são afetados pelos mesmos processos, o que coincide com Fokom *et al.* (2013) que sugeriram que as taxas de deposição e decomposição da PSRG e do COT são semelhantes. Rillig *et al.* (2001) sugerem que os FMAs aumentam os estoques de MOS do solo mediante a secreção de PSRG sugerindo que ela se acumula no solo já que apresenta tempos de ciclagem de décadas, e conclui que o C de origem fúngico é um grande contribuinte aos reservatórios de MOS.

#### 4.4 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

O C-MOP oscilou entre  $2,74$  e  $16,67 \text{ mg g}^{-1}$ , com uma média de  $8,6 \text{ mg g}^{-1}$  (tabela 5) e apresentou um coeficiente de variação de  $39,3\%$  ao longo da área, ligeiramente menor do que o C.V. do COT. O teor de N-MOP teve um valor médio de  $0,41 \text{ mg g}^{-1}$  e foi mais heterogêneo quando comparado com o NT, com um coeficiente de variação de  $53\%$  sendo o parâmetro orgânico mais variável.

A razão molar C/N da MOP (C/N-MOP) foi variável na extensão da área, com valores desde  $14$  até  $38$  (tabela 5). Tal condição se deve à diversidade de materiais orgânicos de onde a MOP se origina: pequenos galhos, folhas, exoesqueletos de fauna. Por exemplo, resíduos de galhos do semiárido cearense podem apresentar relação C/N (gravimétrica) na faixa de  $39,8$  a  $75,5$  enquanto que a

C/N de folhas pode estar na faixa de 19,2 a 30,8 (OLIVEIRA *et al.*, 2017). Além das diversas qualidades, os resíduos aportados pela vegetação se encontram no solo em diferentes graus de decomposição, contribuindo assim para alta variação do C com relação ao N da MOP.

Tabela 5 - Estatística descritiva dos parâmetros do fracionamento físico da matéria orgânica do solo da área da jazida

	<b>C-MOP</b> ----- mg g <sup>-1</sup> -----	<b>N-MOP</b> ----- mg g <sup>-1</sup> -----	<b>C/N- MOP</b>	<b>C-MAM</b> ----- mg g <sup>-1</sup> -----	<b>N-MAM</b> ----- mg g <sup>-1</sup> -----	<b>C/N- MAM</b>
<b>Média</b>	8,60	0,41	27,84	13,69	1,35	11,78
<b>Desvio padrão</b>	3,38	0,22	7,42	6,08	0,53	1,72
<b>Mínimo</b>	2,74	0,09	14,24	2,76	0,22	8,01
<b>Máximo</b>	16,67	1,07	38,19	27,19	2,51	16,08
<b>Q 1</b>	6,01	0,24	22,52	9,52	1,09	10,64
<b>Q3</b>	10,58	0,52	34,27	17,38	1,63	12,62

Fonte: Elaborado pela autora.

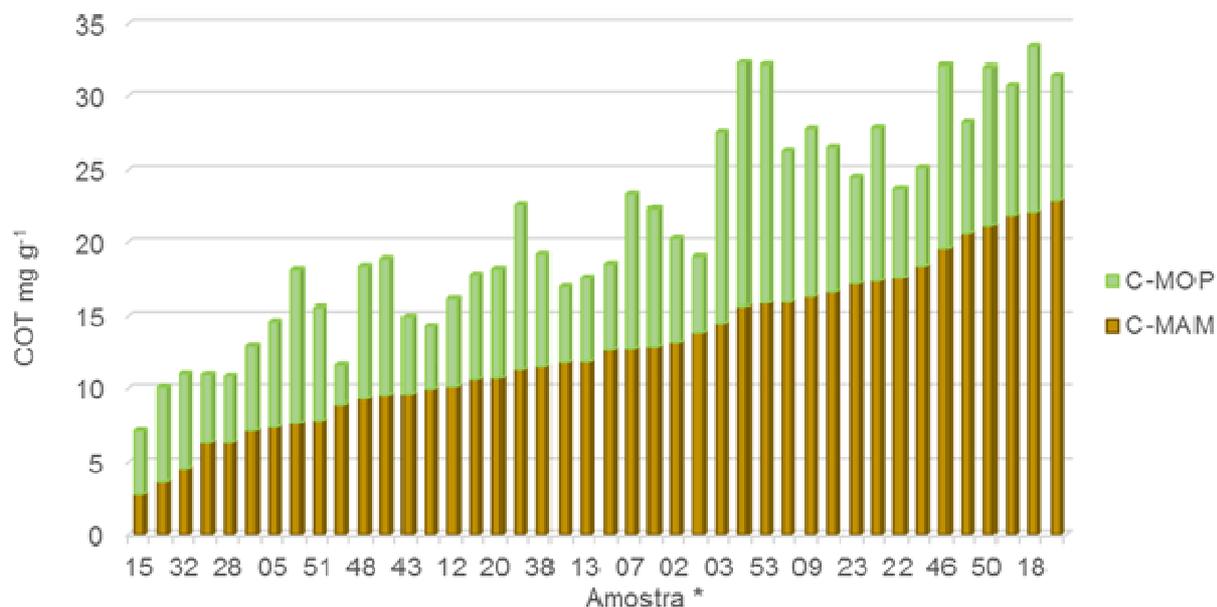
Resultados com base em solo seco.

O C-MAM tem um valor médio de 13,69 mg g<sup>-1</sup> e o N-MAM tem uma média de 1,35 (tabela 5). Chama a atenção que os teores de C-MAM e N-MAM (que correspondem a frações estáveis) são semelhantes às médias de COT e de NT dos solos da região (figuras 4 e 5).

O tempo de vida médio do C da MOP oscila entre 3 e 18 anos (BALESDENT, 1996), por isso os valores de C-MAM e N-MAM tendem a ser maiores do que os da MOP. O solo da área de Itataia segue essa tendência, tendo mais C e N estabilizados na fração mineral: em média a percentagem do COT alocado na MAM (%C-MAM) corresponde a 60% e a proporção do NT alocado na MAM (%N-MAM) corresponde a 78%. A %N-MAM apresentou 9% de CV, sendo o parâmetro com menor variação ao longo dos 154 hectares avaliados. Nas figuras 8 e 9 aprecia-se a distribuição do COT e o NT entre estas duas frações orgânicas.

Na figura 8 pode se observar que as amostras com maiores teores de C-MAM não necessariamente apresentam altos teores de C-MOP. Ambos os parâmetros apresentaram uma correlação moderada com  $r = 0,58$  ( $p > 0,001$ ). Da mesma maneira amostras que alocam maiores teores de N-MAM não necessariamente têm altos teores de N-MOP ( $r = 0,60$ ,  $p > 0,001$ ), como se observa na figura 9.

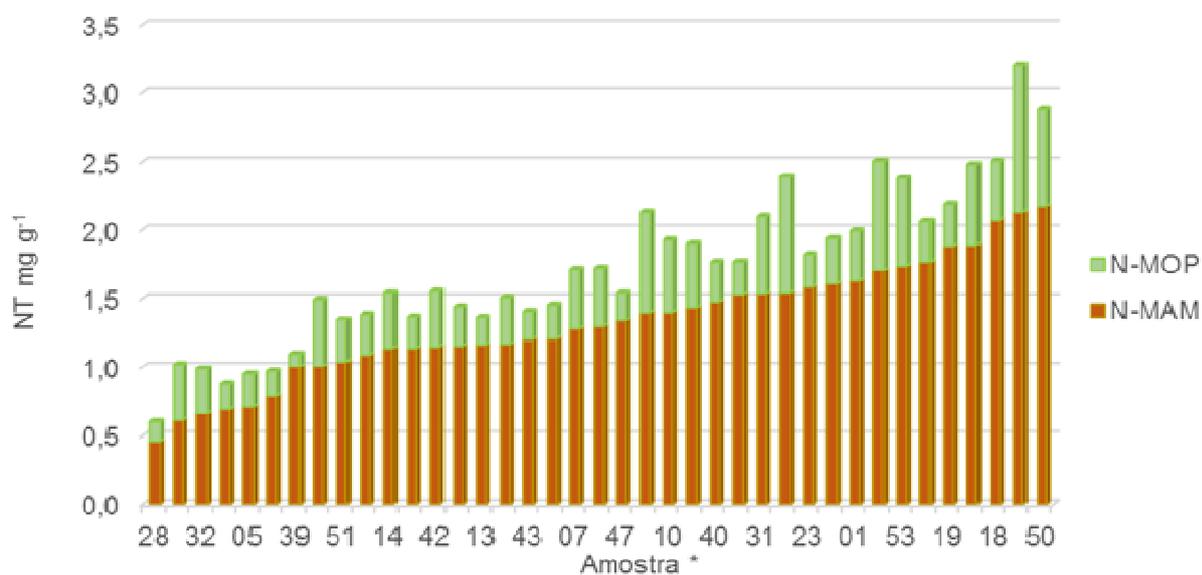
Figura 8 - Distribuição do COT entre a fração MOP e MAM nas amostras do solo da área da jazida de Itaitaia.



Fonte: Elaborado pela autora.

\*Amostras aparecem em ordem crescente de C-MAM.

Figura 9- Distribuição do NT entre a fração MOP e MAM nas amostras do solo da área da jazida de Itaitaia.



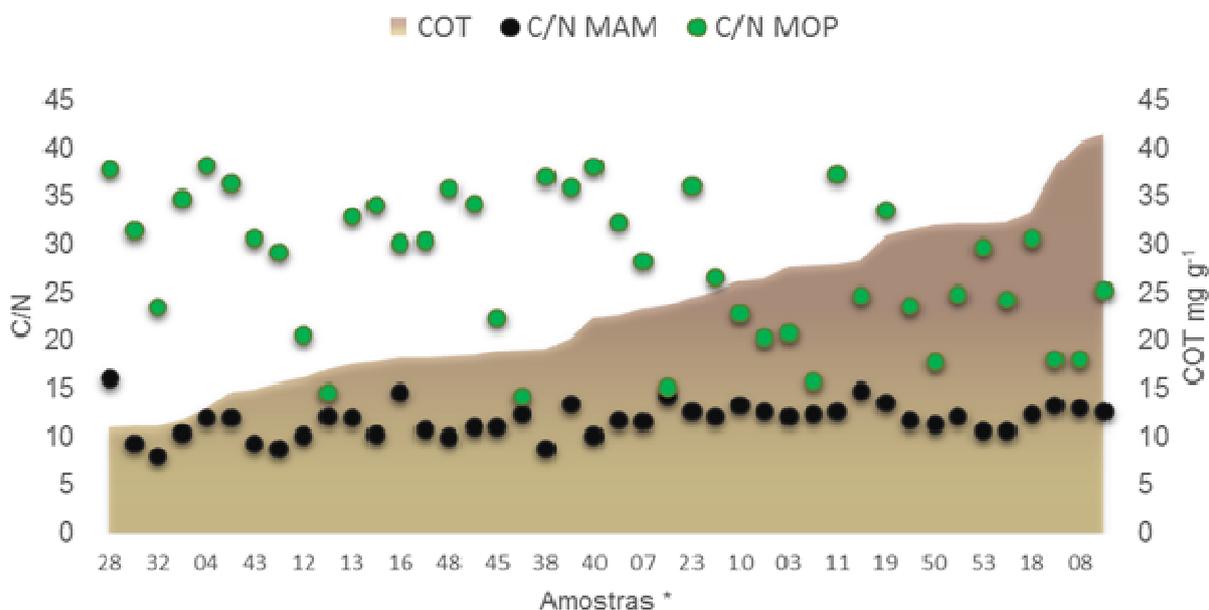
Fonte: Elaborado pela autora.

\*Amostras aparecem em ordem crescente de N-MAM.

A alta proporção do N estável do solo em estudo evidencia o processo de imobilização do N que têm sido amplamente reportado nos processos de humificação da MOS (KNICKER, 2011; KIRKBY *et al.*, 2013). O coeficiente de variação do C-MAM foi de 44,4% ao longo da área da jazida, e o do N-MAM foi 39,2%, no entanto, por causa dos processos de decomposição e estabilização, a razão molar C/N da MAM (C/N-MAM) é mais homogênea apresentando só 15% de coeficiente de variação, com um valor médio de 11,78 (tabela 5).

Independentemente do teor de COT e da C/N-MOP, os processos de estabilização, geram uma MAM com C/N inferior e relativamente constante ao longo da área como se aprecia na figura 10. Cambardella e Elliot (1992) também encontraram que a C/N-MAM atingia um valor semelhante, ainda em solos com diferentes teores de COT e de C/N-MOP.

Figura 10. Variação da razão C/N do solo entre os dois compartimentos da MOS avaliados e sua independência com o teor de COT nas amostras de solo da jazida

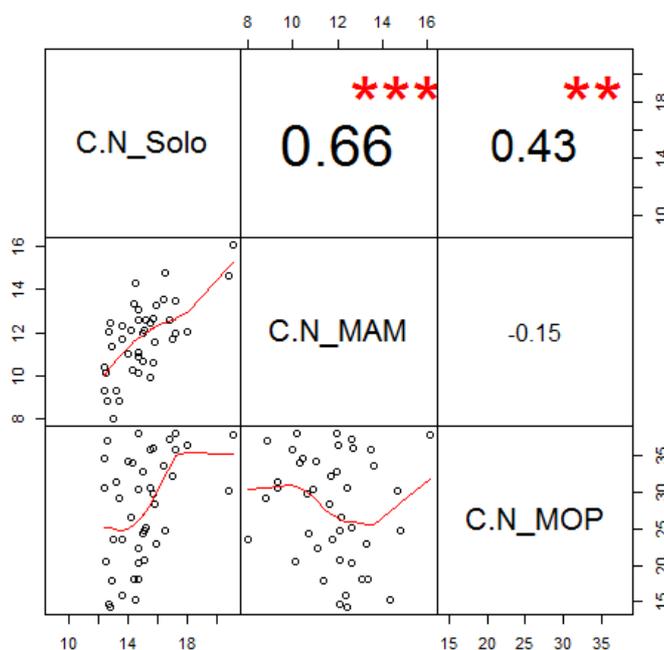


Fonte: Elaborado pela autora.

\*Amostras aparecem em ordem crescente de COT

A C/N-solo reflete principalmente a C/N-MAM ( $r=0,66$ ), e apresenta uma correlação baixa ( $r=0,43$ ) com a C/N-MOP como observado na matriz de correlações na figura 11. A ausência de correlação entre C/N MOP e C/N MAM coincide com Schmidt (2011), quem explica que os estádios iniciais de decomposição não podem ser usados para prever a persistência da MOS por longos períodos de tempo, enfatizando que outros fatores, além da qualidade inicial, influenciam a quantidade e qualidade da MOS.

Figura 11. Diagramas de dispersão e coeficientes de correlação de Pearson entre a razão C/N-solo e a C/N-MAM e C/N-MOP



Fonte: Elaborado pela autora.

\*\*P < 0,01, \*\*\*P < 0,001.

Um dos fatores que intervêm na estabilidade do C deste solo é a deposição de MO de origem fúngica. Isto se evidencia nas correlações positivas altamente significativas entre PSRG e C-MAM e entre PSRG e N-MAM com  $r$  de 0,89 e 0,91 respectivamente.

Esta postulação coincide com Singh *et al.* (2016) que encontraram correlação significativa da PSRG com o C-MAM ( $r = 0,95$ ). Os mesmos autores reportam uma alta contribuição do C da PSRG ao C-MAM, especialmente em sistemas com baixa perturbação, nos quais 17% do C-MAM foi atribuído à PSRG, indicando o papel da PSRG no acúmulo e estabilidade do carbono do solo. Zhang *et*

*al.* (2017) reportam que a PSRG possui C recalcitrante e influência direta e indiretamente o acúmulo e estabilidade do C no solo, pela quantidade de C que a conforma e pela proteção que a recalcitrância oferece. De fato, Preger *et al.* (2007) têm sugerido que a PSRG é uma parte importante do C passivo do solo com tempo de residência entre 11 e 92 anos.

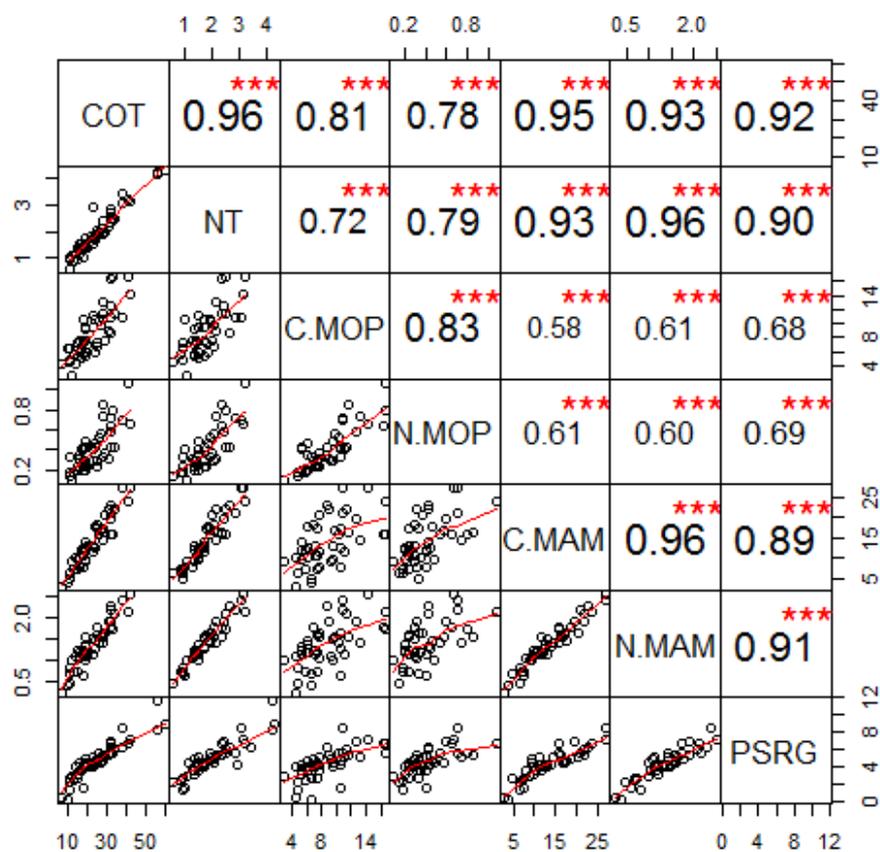
Singh *et al.* (2016) preconizam que os fatores envolvidos na acumulação do COT do solo (mineralogia, textura, vegetação, condições climáticas, agregação) simultaneamente estimulam a proliferação de FMA que a sua vez incrementam os teores de PSRG.

#### **4.5 Síntese das relações dos parâmetros orgânicos**

A C/N-solo reflete principalmente a C/N-MAM, e não tem correlação com os teores de C, N nem PSRG. O %C-MAM e %N-MAM não apresentaram correlações com os teores de C e N dos compartimentos da MOS, indicando que a composição da MOS e a proporção de C e N estáveis são independentes dos teores totais de C e N.

Já o COT e o NT do solo variaram juntos ao longo da área. Assim mesmo, o C e o N de ambas as frações da MOS apresentaram correlações altamente significativas com coeficientes de Pearson de 0,83 para a MOP e 0,96 para a MAM. A PSRG que é composta por C e N também apresentou altas correlações positivas com os teores de C e N do solo, da MOP e da MAM, como pode se apreciar na figura 12.

Figura 12. Diagramas de dispersão e coeficientes de correlação de Pearson dos teores dos reservatórios de C e N do solo da área da jazida de Itataia



Fonte: Elaborado pela autora.

\*\*\*P < 0,001.

Este comportamento evidencia que há fatores comuns subjacentes aos teores de COT, NT e PSRG no solo, assim como ao teor de C-MAM e N-MAM e C-MOP e N-MOP, refletindo processos globais de entradas e saídas de C no sistema solo (crescimento vegetal e deposição de resíduos, relações simbióticas com FMAs e produção de exsudados, disponibilidade de P, disponibilidade de cátions, superfície específica dos minerais, formação de agregados e proteção dentro deles), tudo agindo em conjunto para manter simultaneamente estoques de C, N e PSRG.

Considerando que estes 7 parâmetros variam juntos ao longo da área, aplicou-se a técnica de análise fatorial para reduzir a dimensionalidade e facilitar a exploração de relações com outras variáveis do solo.

Assim foi efetuado o teste de esfericidade de Bartlett na matriz de correlações das variáveis COT, NT, PSRG, C-MAM, C-MOP, N-MAM, N-MOP obtendo um  $p < 0,05$ , indicando que é correto efetuar a análise de fatores. O critério Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) foi superior a 0,6, confirmando que esta técnica é adequada para esta matriz de dados. Só um dos autovalores da matriz de correlações foi superior a 1,0, indicando que, pelo critério de Kaiser, um único fator representa as 7 variáveis. Na tabela 6 se observam as cargas fatoriais obtidas, todas com comunalidades maiores do que 0,64 o que se interpreta como adequadas.

Tabela 6. Cargas fatoriais do índice dos reservatórios da MOS

	Cargas fatoriais	Comunalidade
COT	0,99	0,98
NT	0,99	0,97
PSRG	0,94	0,88
C-MAM	0,92	0,85
C-MOP	0,80	0,64
N-MAM	0,93	0,87
N-MOP	0,82	0,67
Autovalor		5,86
Proporção de variância		0,84

Fonte: Elaborado pela autora  
Análise de fatores elaborada no software R a partir da matriz de correlações (pacotes *psych* e *GPArotation*).

Mediante combinações lineares das cargas fatoriais com os valores originais das variáveis criou-se uma variável latente denominada 'Indicador de reservatórios da MOS' (I.MOS) que compila os teores de C e N tanto totais quanto das frações orgânicas assim como o teor de PSRG. Assim, valores altos do I.MOS implicam valores altos de COT, NT, PSRG, C-MAM, C-MOP, N-MAM e N-MOP.

O I.MOS representa as 7 variáveis com alta confiabilidade o que facilita a exploração e interpretação de correlações com outros parâmetros do solo.

#### 4.6 Relações da MOS com granulometria, Ca, P e metais pesados

A percentagem de silte e argila e os teores Ca disponível, P disponível e total e metais pesados do solo da área da jazida foram quantificados em um estudo prévio (CUNHA, 2017) e os resultados podem ser observados no anexo 1.

A análise de correlação de Spearman entre os parâmetros orgânicos (determinados no presente estudo) e os físicos e químicos (previamente determinados por Cunha, 2017), gerou coeficientes maiores do que a análise de correlação de Pearson, indicando que as interações da MOS com estes parâmetros são melhor exploradas por relações não lineares. Pelo tanto, na tabela 7 apresentam-se os coeficientes de correlação de Spearman.

Tabela 7. Coeficientes de correlação de Spearman ( $r_s$ ) entre parâmetros orgânicos e granulometria, Ca, P e teores semitotais de metais pesados.

Parâmetro <sup>1</sup>	I.MOS	% C-MAM	% N-MAM	C/N MOS	C/N MOP	C/N MAM
Agila+silte	0,40**	0,56***	0,07	-0,04	-0,25	0,43**
Ca	0,35*	0,36*	-0,12	0,25	-0,27	0,72***
P disponível	0,09	0,06	0,02	-0,02	0,04	-0,03
P total	0,26	0,35*	0,03	0,22	-0,08	0,49**
U	0,06	0,01	-0,08	0,13	0,04	0,15
Cd	0,21	-0,05	-0,08	-0,10	-0,16	-0,12
Zn	0,01	-0,09	-0,02	0,14	-0,01	-0,05
B	0,20	-0,18	-0,22	0,01	-0,19	-0,13
Cu	0,16	-0,10	-0,14	-0,03	-0,17	-0,20
Fe	0,09	-0,18	-0,13	0,25	-0,02	0,01
Mn	0,23	-0,23	-0,24	0,27	-0,07	0,04
Ni	0,07	-0,16	0,02	0,19	0,08	-0,11
As	0,10	-0,02	-0,21	0,14	-0,18	0,21
Al	0,31*	0,10	-0,12	0,16	-0,19	0,17
V	-0,30*	-0,21	0,22	0,02	0,35*	-0,32*
Pb	0,33*	0,18	-0,21	0,13	-0,31*	0,36*
Co	0,01	-0,24	-0,06	-0,08	-0,05	-0,39*
Mo	-0,04	-0,02	0,15	-0,35*	0,00	-0,40**
Cr	-0,22	-0,03	0,40**	-0,04	0,39*	-0,33*
Se	-0,20	-0,10	0,26	0,13	0,36*	-0,14

Fonte: Elaborado pela autora.

<sup>1</sup>determinados na camada de 0 a 10 cm por Cunha (2017).

Coeficientes de correlação de Spearman a 5% de significância.

\*P < 0,05, \*\*P < 0,01, \*\*\*P < 0,001.

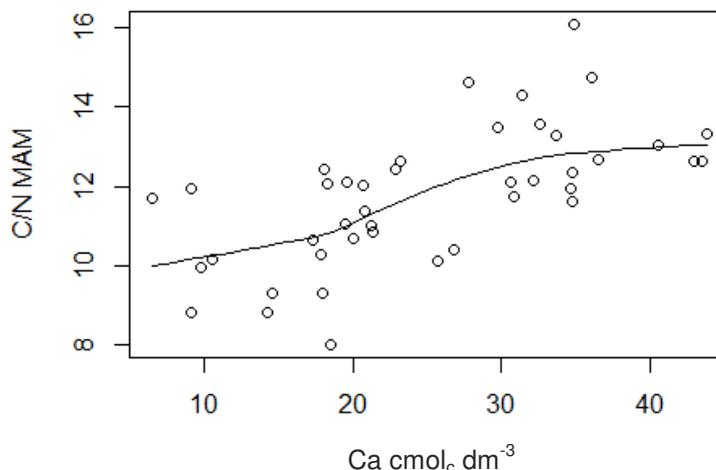
Diversos estudos têm reportado altas correlações negativas entre a quantidade de areia e teor de MOS (KÖGEL-KNABNER *et al.*, 2008), devido à ocorrência de interações da fração silte e argila com a MOS. Diferente disso, no solo de Itataia a proporção de argila + silte apresentou uma correlação débil com o I.MOS (tabela 7), indicando que o mecanismo de estabilização mediante formação de complexos com as superfícies minerais não é dominante.

Altas correlações de Ca com N, CO e PSRG foram reportadas por Silva *et al.* (2017) na caatinga. No solo de Itataia se observa o mesmo comportamento, porém com menor intensidade já que a correlação do Ca com o I.MOS foi fraca (tabela 7). O Al e o Pb também têm correlação positiva fraca com o I.MOS (tabela 7). Já tem sido amplamente reportada a interação da MOS com cátions bi e trivalentes que permitem proteção da MOS tanto pela estabilidade do complexo organomineral quanto pelo efeito na agregação (ROSCOE e MACAHDO, 2002; KLEBER *et al.*, 2015).

A %C-MAM não tem correlação com nenhum metal pesado, mas apresenta relações fracas positivas com Ca, P e silte+argila, sendo a última altamente significativa (tabela 7). Balaria (2011) encontrou que Ca e P ajudam na estabilidade de materiais orgânicos lábeis provavelmente devido a que originam ligações deles com a matriz mineral do solo.

Os teores de COT e de NT não apresentaram correlação com a C/N-MAM, mas foi encontrada uma relação moderada da C/N-MAM com o teor de Ca (tabela 5), sugerindo que a MAM de amostras com mais Ca tende a ser mais enriquecida em C do que em N. Na figura 13 se observa que este comportamento se evidencia mais em amostras com teores de Ca entre 20 e 30  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Radmanović *et al.* (2015) estudando Rendzinas acharam evidencia do efeito dominante das propriedades químicas do solo comparado com o efeito da qualidade e quantidade de resíduos orgânicos sobre o grau de humificação da MOS.

Figura 13. Diagrama de dispersão do Ca e a C/N-MAM.



Fonte: Elaborado pela autora.  
As variáveis apresentaram  $r_s = 0,72$  ( $p > 0,001$ ).

O Ca e PSRG estão relacionados aos altos teores de COT e NT, e com a proporção do carbono associado à MAM, indicando que a formação de microagregados estáveis pode ser um mecanismo de proteção física da MOS importante neste solo.

Já que o material parental é rocha fosfática e a matéria orgânica do solo deve ser enriquecida com P, o P orgânico pode ser um fator controlador dos teores de C e N neste solo devido ao balanço estequiométrico característico da MOS (TIPPING *et al.*, 2016; KIRKBY *et al.*, 2013). Isto é coerente com a relação positiva achada entre P total e C/N da MAM (tabela 6).

A C/N-MAM é a variável orgânica que se relaciona com mais parâmetros do solo. A percentagem de argila e silte, o teor de Ca disponível, P total e Pb favorecem mais o C com relação ao N-MAM, enquanto que os teores de V, Co, Mo e Cr favorecem mais o enriquecimento de N nesta fração com relação ao C (tabela 6). Sugere-se que todos estes fatores interagem simultaneamente originando uma C/N-MAM relativamente homogênea ao longo da área, independentemente dos teores de C e N totais (como foi discutido na figura 10).

Os teores semitotais de V e Pb exibem correlações fracas com os parâmetros orgânicos, com comportamentos antagônicos entre si: Enquanto o Pb é positivo para o índice de MOS e C/N-MAM e negativo para C/N-MOP, o V é negativo

para o índice de MOS, C/N-MAM e positivo para C/N-MOP (tabela 6). Esta apreciação é congruente com a relação linear negativa descrita por Akoumianaki-loannidou *et al.* (2016) entre o V e o Pb orgânicos ( $r=-0,74^{**}$ ) em tecidos vegetais. Cabe salientar que os teores semitotais de ambos os metais não apresentam nenhuma correlação, indicando que não é a MOS quem controla seus teores no solo (do contrário seria evidente uma correlação negativa entre eles).

O Cr apresentou uma fraca correlação significativa com a porcentagem de N alocado na MOM com relação ao NT, e fraca correlação negativa com a razão C/N-MAM; a razão C/N-MOP apresentou correlação positiva fraca com este metal (tabela 6), o que sugere que o Cr está envolvido na imobilização do N na fração mineral do solo, devido a sua alta afinidade de complexar com compostos nitrogenados (ROCHA, 2016), deixando-o menos disponível para as plantas, assim estas depositam resíduos mais enriquecidos em C.

Não se encontraram correlações significativas entre os parâmetros orgânicos e o teor de P disponível nem os teores semitotais dos metais U, Cd, Zn, B, Cu, Fe, Mn, Ni e As (tabela 6). Segundo o documentado por Echevarria *et al.* (2001) e Rout *et al.* (2015), é provável que o U esteja interagindo principalmente com o Fe e os carbonatos, abundantes neste solo (CUNHA, 2017) e por isso não sejam evidentes as relações do teor semitotal de U com os parâmetros orgânicos. Assim mesmo, o Ni pode precipitar com os óxidos de Fe (ZAPATA, 2014b) e é provável que as interações MOS-Ni acabem sendo mascaradas ou diminuídas.

## 5 CONCLUSÕES

O presente estudo é o primeiro a tratar de PSRG em solos com urânio. Os altos teores encontrados implicam a existência de FMAs eficientes na produção de PSRG adaptadas a solos com altos teores de P e U, metais pesados e período de estiagem superior a 7 meses por ano.

As correlações positivas altamente significativas entre PSRG e os teores de COT e NT, C-MAM e N-MAM, são mais uma evidência de que os fatores envolvidos na acumulação de MOS também influenciam a propagação de FMAs aumentando assim as concentrações de PSRG e simultaneamente de MOS.

Mesmo em ambientes semiáridos com altas temperaturas anuais, há solos cujas condições mineralógicas representam um potencial de acúmulo de C.

A qualidade do material orgânico em estados iniciais de decomposição não é o principal fator determinante da composição e quantidade da MOS estável, corroborando a importância de outros fatores no sequestro de C como os teores de P, Ca, metais pesados, os compostos de origem microbiano e a granulometria.

Os teores de COT, NT e PSRG, prévio às atividades de exploração, servirão como níveis de referência para o planejamento de futuros projetos de remediação ou compensação ambiental.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Sugere-se maior exploração do semiárido para identificar mais sítios específicos com alta capacidade de estocar CO e reconsiderar o paradigma de que os semiáridos têm pouco potencial para estocagem de carbono orgânico.

Recomenda-se a realização de pesquisa microbiológica do solo da jazida, principalmente identificar fungos micorrízicos desta área para detectar as cepas capazes de incrementar os teores de glomalina em solos com metais pesados e material radiativo, o que seria uma contribuição importante para o Brasil, já que tem se reportado anomalias de urânio por todo o território nacional.

## REFERÊNCIAS

- AKOUMIANAKI-IOANNIDOU, A. *et al.* Effect of vanadium on dry matter and nutrient concentration in sweet basil ('*Ocimum basilicum*'L.). **Australian Journal of Crop Science**. 2016; 10: 199-206.
- BALABANE, M.; *et al.* Mutual effects of soil organic matter dynamics and heavy metals fate in a metallophyte grassland. **Environmental Pollution**. 1999; 105:45-54.
- BALARIA, A. **Effects of calcium addition on structure and bioavailability of soil organic matter**. Syracuse University, 2011.
- BALESDENT, J. The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils. **European Journal of soil science**. 1996; 47: 485-493.
- BARROS DE MELO, A. A. *et al.* Spatial distribution of organic carbon and humic substances in irrigated soils under different management systems in a semi-arid zone in Ceará, Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**. 2016; 37.
- BIRD S. B.; *et al.* Spatial heterogeneity of aggregate stability and soil carbon in semi-arid rangeland. **Environmental Pollution**. 2002; 116: 445-455
- BOGUNOVIC, I.; PEREIRA, P.; BREVIK, E. C. Spatial distribution of soil chemical properties in an organic farm in Croatia. **Science of the total environment**. 2017a; 84:535-545.
- BOGUNOVIC, I. *et al.* Short-range and regional spatial variability of soil chemical properties in an agro-ecosystem in eastern Croatia. **Catena**. 2017b; 154:50-62.
- BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical biochemistry**. 1976; 72:248-254.
- BREMNER, J. M., *et al.* Nitrogen-total. **Methods of soil analysis**. Part 3-Chemical methods., 1996, p. 1085-1121.
- BURDON, J. Are the Traditional Concepts of the Structures of Humic Substances Realistic? **Soil Science**. 2001; 166:752-769.
- CAMBARDELLA C.A.; ELLIOTT E. T. Particulate soil Organic-Matter Changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**.1992; 56:777-783.
- CAMBARDELLA, C. A.; KARLEN, D. L. Spatial analysis of soil fertility parameters. **Precision Agriculture**, 1999; 1:5-14.

CARDOSO, F.P.C. **Carbono orgânico e glomalina afetados por sistemas de cultivo de longa duração**. 2017. Dissertação (mestrado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

CHEN, T., *et al.* Spatio-temporal variability of farmland soil organic matter and total nitrogen in the southern Loess Plateau, China: a case study in Heyang County. **Environmental Earth Sciences**. 2016; 75: 28.

CORNEJO P; *et al.* Glomalin-related soil protein in a Mediterranean ecosystem affected by a copper smelter and its contribution to Cu and Zn sequestration. **Science of the Total Environment**. 2008; 406:154-160.

COTRUFO, M. F.; *et al.* Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. **Nature Geoscience**. 2015; 8:776-779.

CUNHA, C. S. M.; *et al.* Spatial variability and geochemistry of rare earth elements in soils from the largest uranium–phosphate deposit of Brazil. **Environmental Geochemistry and Health**. 2018; 1-15.

CUNHA, C.S. **Metais pesados em solos, plantas e qualidade da água em área de mineração fósforo-uranífera**. 2017. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

DINIZ, J.S. **Teores de glomalina e substâncias húmicas em diferentes estágios sucessionais de floresta seca**. 2011. Dissertação (Mestre em Fitossanidade e Biotecnologia Aplicada) - Departamento de Entomologia e Fitopatologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.

DUARTE C.F. *et al.* Carbono e nitrogênio sob rotação de culturas no Semiárido em solo arenoso *In: XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, 2015, Natal. **Anais...** Natal, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

ECHEVARRIA, G.; *et al.* Effect of pH on the sorption of uranium in soils. **Journal of Environmental Radioactivity**. 2001; 53:257-264.

EKSCHMITT, K.; *et al.* Soil-carbon preservation through habitat constraints and biological limitations on decomposer activity. **Journal of Plant Nutrition**. 2008; 171:27-35.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília. 2013. 353p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Rio de Janeiro. 1997. 212p.

FOKOM, R. *et al.* Glomalin, carbon, nitrogen and soil aggregate stability as affected by land use changes in the humid forest zone in South Cameroon. **Applied Ecology and Environmental Research**. 2013; 11:581-592.

FRACETTO F. J. C. *et al.* Estoques de carbono e nitrogênio no solo cultivado com mamona na caatinga. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. 2012; 36:1545-1552

FUNCEME. Secretaria dos recursos hídricos. Governo do estado do Ceará. Disponível em: <http://www.funceme.br/index.php/areas/23-monitoramento/meteorol%C3%B3gico/548-gr%C3%A1fico-de-chuvas-dos-postos-pluviom%C3%A9tricos>. Acesso em: 30 de março de 2017

GIONGO, V.; *et al.* Carbono no Sistema Solo-Planta no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**. 2011; 4:1233-1253.

GLEIXNER, G. Soil organic matter dynamics: A biological perspective derived from the use of compound-specific isotopes studies. **Ecological Research**. 2013;28: 683–695.

GONZÁLEZ-CHAVEZ M.C.; *et al.* Natural attenuation in a slag heap contaminated with cadmium: The role of plants and arbuscular mycorrhizal fungi. **Journal of hazardous materials**. 2009; 161:1288 -1298.

GREGORICH, *et al.* Chemical and Biological Characteristics of Physically Uncomplexed Organic Matter. **Soil Science Society of America Journal**. 2006; 70: 975-985.

HATTORI, H. Differences in the influence of cadmium on the decomposition of various types of organic materials in soils. **Soil Science and Plant Nutrition**. 1996; 42:737-743.

JANZEN, H. H. Beyond carbon sequestration: soil as conduit of solar energy. **European Journal of Soil Science**. 2015; 66: 19-32.

JANZEN, H. H. Carbon cycling in earth systems – a soil science perspective. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. 2004; 104:399-417.

JÚNIOR, J. T. G. **Implicações geoambientais decorrentes da exploração de urânio no município de Santa Quitéria, Ceará** (Mestrado – dissertação). Fortaleza: Universidad Federal do Ceará, 2012.

KÖGEL-KNABNER, I.; *et al.* Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 2008, vol. 171, no 1, p. 61-82.

KIRKBY, C. A. *et al.* Stable soil organic matter: a comparison of C: N: P: S ratios in Australian and other world soils. **Geoderma**. 2011; 163: 197-208.

- KIRKBY C. A. *et al.* Carbon-nutrient stoichiometry to increase soil carbon sequestration. **Soil Biology & Biochemistry**. 2013; 60:77-86
- KLEBER, M., *et al.* Mineral–Organic Associations: Formation, Properties, and Relevance in Soil Environments. **Advances in Agronomy**. 2015; 130:1-140.
- KNICKER H. Soil organic N - An under-rated player for C sequestration in soils? **Soil Biology & Biochemistry**. 2011; 43: 1118-1129.
- LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**. 2015; 528:60-68.
- LOURENÇO V. R. *et al.*, Influência relativa dos parâmetros umidade e serrapilheira no teor de carbono em diferentes manejos da caatinga. *In*: III Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido – SBRNS, 2017, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, UFC, Grupo de Pesquisa e Extensão em Manejo de Água e Solo no Semiárido (MASSA), 2017.
- MENDONÇA, E.; MATOS, E. **Matéria Orgânica do solo: Métodos de Análises**. Viçosa- MG; 2005. p. 77.
- MYERS, D. The University of Arizona Department of Mathematics Tucson, Arizona 2016 Disponível em:  
<[https://www.researchgate.net/post/Variogram\\_models\\_show\\_no\\_change\\_in\\_variance\\_over\\_distance](https://www.researchgate.net/post/Variogram_models_show_no_change_in_variance_over_distance) What might be a proper method for interpolation> Acesso em: 30 de janeiro de 2018.
- NICHOLS, K. A.; WRIGHT, S. F. Comparison of glomalin and humic acid in eight native US soils. **Soil Science**. 2005;170: 985-997.
- NOBRE C.P. *et al.* Agregação, glomalina e carbono orgânico na chapada do Araripe, Ceará, Brasil. **Revista Caatinga**. 2015; 28(1).
- OLIVEIRA, F.R.A. *et al.* Influência da adubação verde com leguminosas arbóreas sobre nutrientes de solo degradado no semiárido cearense. *In*: Anais do I Simpósio de Manejo de Solo e Água, II Workshop de Manejo de Água de Qualidade Inferior na Agricultura & I Encontro do Projeto Casadinho/PROCAD/CNPq – UFERSA/ESALQ/UFV. **Anais...**Mossoró(RN) UFERSA, 2017.
- PICCOLO, A. The Supramolecular Structure of Humic Substances: A Novel Understanding of Humus Chemistry and Implications in Soil Science. **Advances in Agronomy**. 2002; 75:57-134.
- PREGER, A. C. *et al.* Losses of glomalin-related soil protein under prolonged arable cropping: A chronosequence study in sandy soils of the South African Highveld. **Soil Biology and Biochemistry**. 2007; 39: 445-453.

RADMANOVIĆ S. B.; ĐORĐEVIĆ A. R.; NIKOLIĆ N. S. Humification degree of rendzina soil humic acids influenced by carbonate leaching and land use. **Journal of Agricultural Sciences**. 2015; 60: 443-453

RIBEIRO, V. A. L., *et al.* Extração líquido-líquido de urânio(VI) do colofanito de itaia (Santa Quitéria, Ceará) por extratantes orgânicos em presença de ácido fosfórico. **Química Nova**. 2008; 31:2159-2164.

RILLIG, M. C., *et al.* Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. **Plant and Soil**. 2001; 233:167-177.

RILLIG, M.C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. **Canadian Journal of Soil Science**. 2004; 84:355-363.

(RIMA) - **Relatório de Impacto Ambiental**. Projeto Santa Quitéria - Santa QUITÉRIA, CE. 2014. Disponível em: <<http://www.consorciosantaquiteria.com.br/arquivos/RIMA.pdf>> Acesso em 10/02/2018.

ROCHA, S. A. **Determinação espectrofotométrica de cromo (IV) na presença de cromo (III) usando Br-PADAP**. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

ROOS P.; JAKOBSEN I. Arbuscular mycorrhiza reduces phytoextraction of uranium, thorium and other elements from phosphate rock. **Journal of Environmental Radioactivity**. 2008; 99: 811-819.

ROSCOE, R; MACHADO, P. L. O. **Fracionamento físico do solo em estudos de matéria orgânica**. Embrapa Agropecuária Oeste-Livros técnicos (INFOTECA-E), 2002.

ROUT, S.; *et al.* Study on speciation and salinity-induced mobility of uranium from soil. **Environmental Earth Sciences**. 2015; 74:2273-2281.

SANTANA M.S. **Estoques de carbono e nitrogênio em solos do sertão pernambucano sob diferentes usos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Centro de Tecnologia e geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SCHAEFFER, A.; *et al.* From humic substances to soil organic matter–microbial contributions. In honour of Konrad Haider and James P. Martin for their outstanding research contribution to soil science. **Journal of soils and sediments**. 2015; 15:1865-1881.

SCHMIDT, M. W. *et al.* Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**. 2011; 478:49.

SILVA, C. P.; *et al.* Glomalin-Related Soil Protein Content in Areas of Degraded and Revegetated Caatinga in the Municipality of Irauçuba. **Journal of Agricultural Science**. 2017; 10: 302.

SILVA C. P. **Conteúdo de proteína do solo relacionada à glomalina em solos do município de Irauçuba- CE e sua relação com a degradação**. 2015. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará. 2015.

SILVA, I.R.; MENDONÇA, E.S. **Matéria orgânica do solo**. In: Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B. & Neves, J.C.L. eds. Fertilidade do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.275-374.

SINGH A. K.; RAI A.; SINGH N. Effect of long term land use systems on fractions of glomalin and soil organic carbon in the Indo-Gangetic plain. **Geoderma**. 2016; 77: 41–50.

SINGH, P.K.; *et al.* Glomalin: an arbuscular mycorrhizal fungal soil protein. **Protoplasma**. 2013; 250:663–669.

SIX, J.; *et al.* A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil & Tillage Research**. 2004; 79:7-31.

SOUZA C.S. **Diversidade e atividade de fungos micorrizicos arbusculares em agroecossistemas do semi-árido paraibano**. 2009. Tese (Doutorado em Tecnologias energéticas e nucleares) - Centro de Tecnologia e geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

THOMSEN, I. K. *et al.* Estimating soil C loss potentials from the C to N ratio. **Soil Biology and Biochemistry**. 2008; 40: 849-852.

TIPPING, E.; SOMERVILLE, C. J.; LUSTER, J. The C: N: P: S stoichiometry of soil organic matter. **Biogeochemistry**. 2016; 130:117-131.

VALBRUN W. *et al.* Carbono orgânico total em neossolo litólico da caatinga sob diferentes coberturas do solo *In*: III Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido – SBRNS, 2017, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, UFC, Grupo de Pesquisa e Extensão em Manejo de Água e Solo no Semiárido (MASSA), 2017.

VODNIK, D.; *et al.* The contribution of glomalin-related soil protein to Pb and Zn sequestration in polluted soil. **Science of the Total Environment**. 2008; 392:130-136.

WANG, Qiang, *et al.* Glomalin-related soil protein deposition and carbon sequestration in the Old Yellow River delta. **Science of The Total Environment**. 2018; 625: 619-626.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. John Wiley & Sons, 2007.

WRIGHT, S. F., *et al.* Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. **Plant and Soil**, 1996;181:193-203.

WRIGHT, S. F.; *et al.* Comparison of efficacy of three extractants to solubilize glomalin on hyphae and in soil. **Chemosphere**. 2006; 64:1219-1224.

XU Z.Y.; *et al.* Microbial community structure in the rhizosphere of *Sophora viciifolia* grown at a lead and zinc mine of northwest China. **Science of the Total Environment**. 2012; 435: 453–464.

ZAPATA, R. D. **Los Procesos Químicos de Suelo**.1º ed. Medellín: Universidad Nacional de Colombia; 2014a. Capítulo 4, La Materia Orgánica del suelo; p. 133-184.

--- . **Los Procesos Químicos de Suelo**.1º ed. Medellín: Universidad Nacional de Colombia; 2014b. Capítulo 16, Contaminación Química del Suelo; p. 611-678.

ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, S. *et al.* The application of ecological stoichiometry to plant–microbial–soil organic matter transformations. **Ecological Monographs**, 2015, vol. 85, no 2, p. 133-155.

ZHANG *et al.* Recalcitrant carbon components in glomalin-related soil protein facilitate soil organic carbon preservation in tropical forests. **Scientific Reports**. 2017; 7:2391.

## ANEXO 1

Estatística descritiva da percentagem de argila e silte e teores de Ca, P disponível e total, e metais pesados do solo da área da jazida de Itataia na camada de 0 a 10 cm.

	Argila + Silte	Ca	P		U	Cd	Zn	B	Cu	Fe
			disponí vel	P total						
	%	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	----- ppm -----							
Média	46.3	25.1	2163.2	14451.3	338.2	0.2	47.3	14.7	8.5	25127.9
Desvio padrão	11.1	10.1	2298.5	15490.3	224.7	0.1	14.8	10.0	6.9	13058.2
Mínimo	11.4	6.6	24.9	997.5	108.7	0.0	23.7	3.3	0.4	4113.8
Máximo	76.7	43.7	8058.5	64050.0	982.0	0.7	80.9	51.2	25.9	68147.3

	Mn	Ni	As	Al	V	Co	Pb	Mo	Cr	Se
	----- ppm -----									
Média	440.8	22.2	8.4	11369.5	33.8	7.4	12.7	23.8	25.4	11.3
Desvio padrão	419.6	9.8	6.7	6304.0	16.8	3.6	9.5	19.8	9.5	5.8
Mínimo	47.7	2.1	0.0	1371.2	10.5	0.8	0.6	0.2	12.5	4.8
Máximo	2518.9	51.0	27.1	24563.1	70.0	16.9	52.8	49.4	56.3	36.5

Fonte: Cunha 2017