

**ESTRESSE HÍDRICO NA FLORESTA AMAZÔNICA ALTERA A DISTRIBUIÇÃO E CONTEÚDO DE AGREGADOS E O ESTOQUE DE C E NUTRIENTES DO SOLO***WATER STRESS IN THE AMAZON FOREST CHANGES THE DISTRIBUTION AND CONTENT OF AGGREGATES AND THE STOCK OF C E NUTRIENTS IN THE SOIL***Possidônio Guimarães Rodrigues**Instituto Federal do Pará – Brasil  
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9082-8511>  
E-mail: [possidonio.rodrigues@ifpa.edu.br](mailto:possidonio.rodrigues@ifpa.edu.br)**Hernani José Brazão Rodrigues**Universidade Federal do Pará – UFPA, Brasil  
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5509-6287>  
E-mail: [hernani@ufpa.br](mailto:hernani@ufpa.br)**Saime Joaquina S. de Carvalho Rodrigues**Instituto de Terras do Pará – ITERPA, Brasil  
Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2591-1022>  
E-mail: [saimicrodrigues@gmail.com](mailto:saimicrodrigues@gmail.com)**Antonio Carlos Lôla da Costa**Universidade Federal do Pará – UFPA, Brasil  
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8140-4020>  
E-mail: [lola@ufpa.br](mailto:lola@ufpa.br)**Gabriel Pompeu Rosa**Universidade Federal do Pará – UFPA, Brasil  
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7818-3981>  
E-mail: [pompeu\\_gpr@hotmail.com](mailto:pompeu_gpr@hotmail.com)**Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo**Museu Paraense Emílio Goeldi, Brasil  
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6222-5534>  
E-mail: [ruivo@museu-goeldi.br](mailto:ruivo@museu-goeldi.br)**Submetido:** 2 mar. 2023.**Aprovado:** 27 maio 2023.**Publicado:** 7 jun. 2023.**E-mail para correspondência:**  
[possidonio.rodrigues@ifpa.edu.br](mailto:possidonio.rodrigues@ifpa.edu.br)

**Resumo:** Pesquisas com manipulação de recursos são ferramentas essenciais para entender o impacto das mudanças no ecossistema proporcionadas por eventos extremos, como uma seca prolongada em ambiente úmido. Objetivou-se avaliar o estoque de C e nutrientes no solo, e a massa e teores de C e N de agregados do solo de floresta tropical úmida sob 14 anos de seca induzida em experimento de longa duração (ESECAFLOR) na Floresta Nacional de Caxiuanã, Amazônia oriental. O estudo foi conduzido nas parcelas denominadas Parcela A (controle) e Parcela B (exclusão de aproximadamente 50% da água da chuva continuamente desde 2001), cada uma com 1 ha. Amostras de solo foram coletadas em três camadas (0,0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 m) em março de 2015, em quatro pontos (n=4) utilizando-se trado holandês (nutrientes), amostrador de anel cilíndrico (densidade) e trincheira para retirada de monólitos de 1 dm<sup>3</sup> para agregados do solo. Foram determinados os teores de C, N, P, Ca, Mg e K, a densidade do solo, a massa de agregados das classes de diâmetro: >4; 4-2; 2-1; 1-0,25; 0,25-0,053 e <0,053 mm e os teores de C e N em cada classe de agregados. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas via teste t (estoque C e nutrientes) e Tukey (massa e teores de C e N dos agregados). Ocorreu diferença significativa na densidade do solo e estoque de nutrientes entre as parcelas A e B. O estoque de C do solo foi maior na Parcela A e os estoques de P, K e Mg foram maiores na parcela B em todas as camadas avaliadas. A Parcela A apresentou maiores massas de macroagregados, e em ambas parcelas houve maior teor de C e N nos microagregados. A seca induzida na floresta afetou a agregação do solo e a dinâmica de C.

**Palavras-chave:** ESECAFLOR. Floresta Amazônica. Seca induzida. Atributos do solo.



**Abstract:** Resource manipulation research is an essential tool for understanding the impact of ecosystem changes brought about by extreme events, such as a prolonged drought in a humid environment. The objective was to evaluate the C stock and nutrients in the soil, and the mass and C and N contents of humid tropical forest soil aggregates under 14 years of induced drought in a long - term experiment (ESECAFLOR) in the Caxiuanã National Forest, eastern Amazonia. The study was conducted in plots called A (control) and B (exclusion of approximately 50% of rainfall continuously since 2001), each with 1 ha. Soil samples were collected in three layers (0.0-0.1, 0.1-0.2, 0.2-0.3 m) in March 2015, in four points (n = 4) using dutch auger (nutrients), cylindrical ring sampler (density) and trench for removal of monoliths of 1 dm<sup>3</sup> for aggregates. The values of C, N, P, Ca, Mg and K, soil density, mass of aggregates of the following diameter classes (> 4; 4-2; 2-1; 1-0.25; 0.25-0.053 and <0.053 mm) and the C and N contents in each class of aggregates were determined. The data were submitted to analysis of variance and the means were compared by t test (C and nutrients stocks) and Tukey test (mass and C and N contents of the aggregates). There was difference in the density and nutrient stock between the plots. The C stock was higher in the Plot A and P, K and Mg were higher in Plot B in all layers evaluated. Plot A presented larger masses of macroaggregates, and in both plots there was a higher content of C and N in the microaggregates. Drought induced in the forest affected soil aggregation and dynamics of C and nutrients.

**Keywords:** ESECAFLOR. Amazon Rainforest. Drought induced. Soil attributes.

## Introdução

Estudos de modelagem climática simulando o desmatamento da Amazônia alertam para reduções significativas no regime pluviométrico das florestas amazônicas, afetando a hidrologia regional e aumentando a vulnerabilidade dos serviços ecossistêmicos para a população local e regional dentro e fora da região amazônica <sup>(1)</sup>. Experimento de seca de longa duração vem sendo conduzido na floresta tropical úmida amazônica há mais de duas décadas para investigar as respostas do ecossistema florestal ante ao estresse provocado pela seca na região <sup>(2)</sup>.

A redução de água no solo pode afetar diversas funções do solo como o movimento de nutrientes, a decomposição dos compostos orgânicos, a absorção de nutrientes pelas plantas <sup>(3)</sup>. Como o fluxo de massa é o principal processo de transporte para a maioria dos nutrientes no solo, logo a umidade se torna um dos principais fatores relacionados ao fluxo e disponibilidade dos nutrientes para a absorção vegetal. A água no solo também é responsável pela interação dos nutrientes com os colóides, permitindo a ocorrência de reações que possibilitam a disponibilização dos nutrientes para absorção.



Pesquisas envolvendo a manipulação de recursos são interessantes para entender o funcionamento do ecossistema em condições de estresse e os dados gerados são úteis para a adaptação de modelos e previsão de cenários futuros. Mesmo assim, apenas oito experimentos de um ou mais anos com exclusão de água da chuva foram implementados em florestas tropicais com reduções na umidade do solo <sup>(2)</sup>. Na Amazônia, o experimento de seca de longa duração ESECAFLOTR trouxe diversas descobertas sobre a resposta da floresta sob condição de estresse hídrico. Sotta *et al.* <sup>(4)</sup> ao caracterizar as parcelas do experimento ESECAFLOTR constataram diferenças entre a parcela Controle e a parcela com exclusão de água da chuva, geralmente com maiores teores de nutrientes na parcela com exclusão. Buscardo *et al.* <sup>(3)</sup> verificaram que na estação seca, pH, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SB e V foram significativamente menores na parcela controle em relação a parcela com seca simulada. Já no período chuvoso constataram que a parcela tratamento apresentou menores concentrações de Ca<sup>2+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, V.

Alguns estudos têm verificado as mudanças ocorridas nos estoques de nutrientes no solo em função do seu tipo de uso ou manejo. Magalhães *et al.* <sup>(5)</sup> avaliaram o estoque de nutrientes em cronossequências florestais na Amazônia e verificaram que o nutriente mais estocado é o Ca (5188,48 e 2912,86 kg ha<sup>-1</sup>) e o menos estocado o K (46,22 e 17,33 kg ha<sup>-1</sup>). Os autores concluíram que a floresta nativa (referência) apresentou os maiores estoques de nutrientes. Também na Amazônia, Johnson *et al.* <sup>(6)</sup> avaliaram estoque de nutrientes em floresta primária e floresta secundária e concluíram que a umidade do solo é mais limitante do que a disponibilidade de nutrientes para crescimento da floresta após o abandono agrícola.

A formação e estabilização de agregados no solo é fundamental para que sua estrutura e funções sejam preservadas. Os agregados do solo estão diretamente relacionados com a retenção e infiltração de água, trocas gasosas, dinâmica da matéria orgânica e dos nutrientes do solo, penetração das raízes e suscetibilidade à erosão <sup>(7)</sup>. Partículas primárias do solo (< 20 µm) se unem para formar microagregados (20-250 µm), enquanto a união destes formam macroagregados (> 250 µm) <sup>(8)</sup>, e quanto maior o estado de conservação do solo, maior a presença de agregados estáveis no mesmo.

Não localizamos na literatura trabalhos que mostrem o efeito de um experimento de seca de longa duração na floresta amazônica sobre os estoques de nutrientes e distribuição de agregados no solo. Levantou-se a hipótese de que ocorre variação no estoque de C e nutrientes no solo, bem como na distribuição e conteúdo de agregados, sob efeito da seca prolongada simulada na floresta tropical amazônica. O objetivo foi avaliar o estoque de C e

nutrientes no solo, e a massa e teores de C e N de agregados em floresta sob 14 anos de seca induzida em experimento de longa duração na Floresta Nacional de Caxiuanã, Amazônia oriental.

## Metodologia

### Área de estudo

O estudo foi realizado na Floresta Nacional de Caxiuanã, localizada no município de Melgaço, Mesorregião Marajó, estado do Pará. No local de estudo se encontra a Estação Científica Ferreira Penna (ECFP) (Figura 1), ligada ao Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), que possui 33 mil hectares (1°42'S, 51°31'W) correspondentes a 10% do total da área da FLONA. O experimento de simulação de seca na floresta foi concebido através do Projeto ESECAFLOR (O Impacto da Seca Prolongada nos Fluxos de Água e Dióxido de Carbono em uma Floresta Tropical Amazônica) e o seu início ocorreu em janeiro de 2001.

**Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará**  
**ESTAÇÃO CIENTÍFICA FERREIRA PENNA - ECFP**  
**MELGAÇO - PARÁ**



Fonte: Dos autores (2022).

O clima da região é do tipo Am, com temperatura média do ar anual de  $25,7 \pm 0,8^\circ\text{C}$ , e pluviosidade média anual de  $2.272 \pm 193$  mm<sup>(9)</sup>. A sazonalidade compreende um período menos chuvoso (entre agosto e novembro) e outro mais chuvoso (entre dezembro e maio)<sup>(10)</sup>. Os solos são ácidos, com valores de pH variando entre 3,5 e 5,5 e são classificados como Latossolo Amarelo, com horizontes A, B e C bem drenados, cor bruno amarelo-escuro a vermelho-amarelo<sup>(11)</sup>. A caracterização química e física do solo das parcelas experimentais se encontra no Quadro 1.

**Quadro 1 - Caracterização física e química do solo da área experimental. Floresta Nacional de Caxiuanã-PA.**

Área	Camada	pH	Corg	N	P	K	Al	Ca	Mg	Areia	Silte	Argila	Ds
		H <sub>2</sub> O	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	%	%	kg m <sup>-3</sup>
Parcela A	0,0 - 0,1	4,29	14,38	0,68	4,48	13,50	1,31	0,25	0,28	69	15	16	1,29
	0,1 - 0,2	4,39	12,91	0,57	2,79	7,15	1,26	0,26	0,20	63	18	19	1,54
	0,2 - 0,3	4,38	10,27	0,49	2,48	5,38	1,24	0,28	0,18	64	15	21	1,60
Parcela B	0,0 - 0,1	4,70	11,25	0,65	6,09	15,14	1,05	0,33	0,37	78	13	9	1,31
	0,1 - 0,2	4,63	10,33	0,64	5,04	10,61	1,26	0,35	0,33	72	14	14	1,32
	0,2 - 0,3	4,76	7,38	0,55	4,88	9,40	0,99	0,34	0,29	71	14	15	1,43

pH; potencial hidrogeniônico, Corg: carbono orgânico, N: nitrogênio total, P: fósforo disponível, K: potássio trocável, Al: alumínio trocável, Ca: cálcio trocável, Mg: magnésio trocável; Ds: densidade global do solo.

Fonte: Dos autores (2022).

O experimento foi criado com a intenção de simular um período de seca prolongada na floresta e avaliar as alterações provocadas pela redução da umidade do solo no ciclo da floresta. Em sua estrutura física o ESECAFLOR é composto por duas parcelas (A e B) de 1 ha cada, sendo uma adjacente a outra (distância de 50 m). A parcela controle denominada Parcela A é a referência para a simulação de seca que ocorre na parcela exclusão, denominada Parcela B. Na Parcela B está sendo realizada a exclusão de aproximadamente 50% da água da chuva, desde a instalação do experimento, com a utilização de painéis plásticos instalados a 1-2 metros de altura da superfície do solo (Figura 2)<sup>(12)</sup>.

**Figura 2 – Detalhe dos painéis instalados na Parcela B do experimento ESECAFLOR na Floresta Nacional de Caxiuanã-PA**



Fonte: Dos autores (2022).

Os limites da Parcela B foram trincheirados até 1 m de profundidade e forrados com plástico para minimizar a entrada ou saída lateral de água na parcela. As manutenções na estrutura das parcelas experimentais (painéis, madeira etc.) ocorreram periodicamente. O perímetro da Parcela A adjacente também foi trincheirado para evitar confusão nos efeitos do tratamento <sup>(12)</sup>. A coleta de dados em campo para a realização desse trabalho ocorreu em 2015, ou seja, 14 anos após o início do experimento.

### **Teor de C e nutrientes do solo**

A amostragem do solo ocorreu em março de 2015. Foram realizadas coletas de solo em oito pontos em cada parcela, com uso de um trado holandês nas profundidades 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, para caracterização química do solo.

Os teores de nutrientes do solo foram determinados conforme metodologia preconizada pela Embrapa <sup>(13)</sup>. Extraíram-se os cátions trocáveis em cloreto de potássio (KCl) 1 N, sendo quantificados por espectrometria de absorção atômica ( $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ ) e fotometria de chama ( $\text{K}^+$ ); o fósforo disponível (P) foi extraído com solução duplo ácido Mehlich I e determinado por colorimetria; o carbono orgânico total (COT) foi extraído por oxidação via úmida com dicromato de potássio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ); e o nitrogênio total (N) por destilação a vapor Kjeldahl.



### Densidade do solo e estoque de nutrientes

Quatro amostras de solo indeformadas foram coletadas em cada parcela nas profundidades 0,0-0,1; 0,1-0,2; e 0,2-0,3 m de profundidade em anel volumétrico para determinação da densidade do solo <sup>(13)</sup>. O estoque de nutrientes nas respectivas camadas de solo foi calculado pelo método da massa de solo equivalente <sup>(14)</sup>, pois houve diferença na densidade do solo entre as parcelas (Quadro 1), sendo utilizada como referência a parcela com menor densidade do solo. Os estoques de nutrientes estão descritos em Mg ha<sup>-1</sup>.

### Massa de agregados e teor de C e N nos agregados do solo

Quatro trincheiras de 30 x 30 x 40 cm foram cavadas para coleta dos monólitos de solo de 10 x 10 x 10 cm. Em cada trincheira três amostras foram coletadas, correspondentes as camadas 0,0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 m. Cada monólito de solo foi armazenado em uma embalagem plástica para preservação da estrutura até o momento da análise. Os blocos foram secos ao ar por 72 h. As amostras coletadas foram tamisadas em peneira de 8 mm. Em seguida 100 g da amostra foram submetidas a um processo de tamisação via seca em um conjunto de 06 peneiras de malhas com aberturas decrescentes (4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,50 mm, 0,25 e 0,053 mm) e reservatório para as classes < 0,053 mm. A partir da massa de solo seca em estufa retida em cada peneira, classificaram-se os tamanhos de agregados em três classes: macroagregados (diâmetro > 2,00 mm), mesoagregados (diâmetro entre 2,00 e 0,250 mm) e microagregados (diâmetro entre 0,250 e 0,053 mm) <sup>(15)</sup>. Os resultados estão descritos em porcentagem.

As amostras de cada classe foram moídas em gral e passadas em peneira de 100 mesh. Em seguida 0,5 g das amostras foram submetidos à determinação da concentração de carbono orgânico total do solo por oxidação via úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico e nitrogênio total do solo determinado por destilação a vapor do tipo Kjeldahl <sup>(13)</sup>. Os resultados estão descritos em g kg<sup>-1</sup>.

### Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância e o efeito das parcelas sobre o estoque de nutrientes e sobre a massa de agregados foram comparadas com teste t ( $p \leq 0,05$ ). Já para verificar o efeito do experimento sobre o teor de carbono e nitrogênio das



frações de agregados realizou-se o teste Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Todas as análises estatísticas foram realizadas no software SigmaPlot.

## Resultados

### Estoque de nutrientes no solo

Os resultados dos estoques de COT, N, P, K, Ca e Mg no solo estão descritos no Quadro 2. O estoque de COT no solo variou entre 8,65 Mg ha<sup>-1</sup> (Parcela B) e 18,62 Mg ha<sup>-1</sup> (Parcela A), ambos na camada 0,0-0,1 m, respectivamente. O estoque de COT no solo foi maior na Parcela A nas camadas de 0,0-0,1; 0,2-0,3 e 0,0-0,3 m. O estoque de N no solo variou entre 0,71 Mg ha<sup>-1</sup> (Parcela A, 0,2-0,3 m) e 0,88 Mg ha<sup>-1</sup> (Parcela A, 0,0-0,1m). Não houve efeito das parcelas no estoque de N no solo. O estoque de P no solo variou entre 0,37 Mg ha<sup>-1</sup> (Parcela A, 0,1-0,2 m) e 0,80 Mg ha<sup>-1</sup> (Parcela B, camada 0,0-0,1m). O estoque de P foi maior na Parcela B em todas as camadas de solo. O estoque de K no solo variou entre 0,92 Mg ha<sup>-1</sup> (Parcela A, 0,2-0,3 m) e 1,98 Mg ha<sup>-1</sup> (Parcela B, camada 0,0-0,1 m). O estoque de potássio (K) foi maior na Parcela B, em relação à Parcela A em todas as camadas de solo.

**Quadro 2 - Estoque de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), fósforo disponível (P), potássio trocável (K), cálcio trocável (Ca) e magnésio trocável (Mg) nas parcelas A (controle) e B (exclusão) do experimento ESECAFLOR, em Caxiuanã, Pará**

Prof.	Área	(Mg ha <sup>-1</sup> )					
		COT	NT	P	K	Ca	Mg
0,0- 0,1 m	Parcela A	18,62 a	0,88 a	0,58 b	1,75 b	6,51 b	4,27 b
	Parcela B	8,65 b	0,85 a	0,80 a	1,98 a	8,59 a	5,74 a
0,1- 0,2 m	Parcela A	17,10 a	0,75 a	0,37 b	0,95 b	6,92 a	3,24 b
	Parcela B	13,68 a	0,85 a	0,67 a	1,40 a	7,35 a	5,30 a
0,2- 0,3 m	Parcela A	17,42 a	0,81 a	0,41 b	0,92 b	8,29 a	3,67 b
	Parcela B	10,54 b	0,71 a	0,70 a	1,34 a	8,21 a	4,95 a
0,0- 0,3 m	Parcela A	53,14 a	2,45 a	1,36 b	3,61 b	21,72 b	11,18 b
	Parcela B	32,88 b	2,45 a	2,16 a	4,73 a	24,15 a	15,99 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna em cada camada de solo não diferem pelo teste t ( $p \leq 0,05$ ) (n=8).

Fonte: Dos autores (2022).

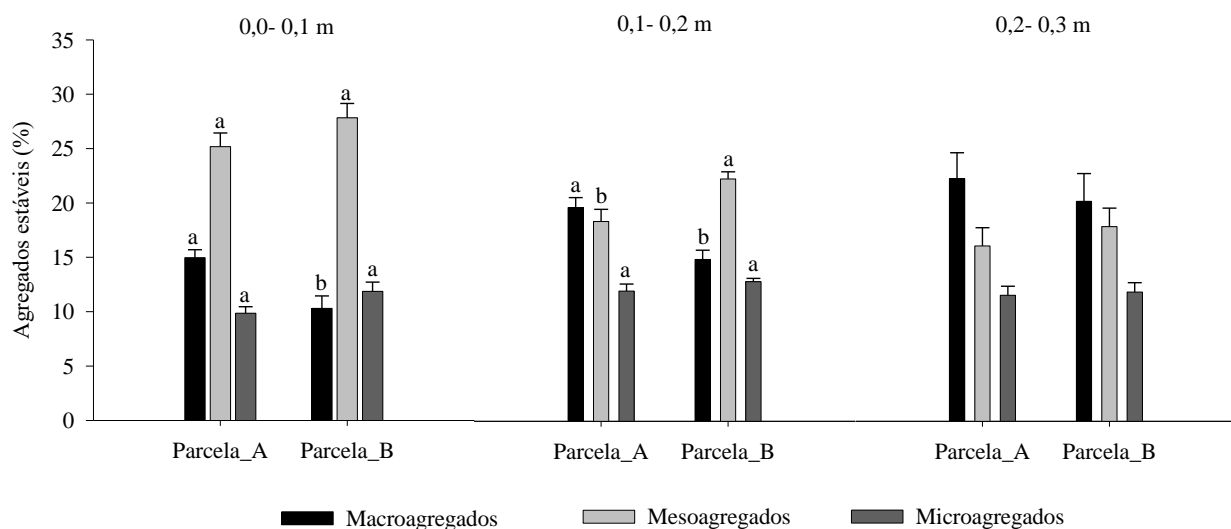


O estoque de Ca no solo variou entre 6,51 Mg ha<sup>-1</sup> (Parcela A 0,0-0,1 m) e 8,59 Mg ha<sup>-1</sup> (Parcela B, camada 0,0-0,1m). O estoque de Ca foi maior na Parcela B, nas camadas de solo 0,0-0,1 m e 0,0-0,3 m (Quadro 2). O estoque de Mg no solo variou entre 3,24 Mg ha<sup>-1</sup> (Parcela A, 0,1-0,2 m) e 5,74 Mg ha<sup>-1</sup> (Parcela B, camada 0,0-0,1m). O estoque de Mg foi maior na Parcela B em todas as camadas de solo.

### Massa de classes e teores de C e N dos agregados do solo.

Os resultados da distribuição relativa de agregados estáveis nas parcelas estão descritos na Figura 02. A porcentagem de macroagregados estáveis variou entre 10,30% (Parcela B, 0,0-0,1 m) e 22,29% (Parcela A, 0,2-0,3 m). A porcentagem de mesoagregados estáveis variou entre 16,13% (Parcela A, 0,2- 0,3 m) e 27,83% (Parcela B, 0,0- 0,1 m). A porcentagem de microagregados estáveis variou entre 9,86% (Parcela A, 0,0- 0,1 m) e 12,84% (Parcela B 0,1- 0,2 m). Na camada 0,0-0,1 m a porcentagem de macroagregados estáveis foi maior na Parcela A (14,96%) em relação à parcela B (10,30%). Não houve efeito significativo para mesoagregados e microagregados nesta camada. Na camada 0,1-0,2 m a porcentagem de macroagregados estáveis foi maior na parcela A (19,66%) em relação à Parcela B (14,88%). Já a porcentagem de mesoagregados estáveis foi maior na Parcela B (22,28%), em relação à Parcela A (18,38%), nessa mesma camada. Na camada 0,2-0,3 m não houve efeito significativo entre as parcelas.

**Figura 3 - Distribuição relativa de agregados estáveis nas parcelas A (controle) e B (exclusão) do experimento ESECAFLOR, em Caxiuanã, Pará**





Macroagregado ( $\varnothing > 2,00$  mm), mesoagregado ( $\varnothing$  entre 2,00-0,25 mm) e microagregado ( $\varnothing$  entre 0,25-0,053 mm). Médias seguidas pela mesma letra para a mesma classe de agregado e camada de solo não diferem pelo teste t ( $p \leq 0,05$ ) ( $n=4$ ).

Fonte: Dos autores (2022).

Os teores de C e N em cada fração de agregados do solo nas Parcelas A e B estão descritos no Quadro 3. Os teores de C nos agregados do solo na camada de 0,0- 0,1 m sofreram influência da interação fração de agregado e parcela ( $p = 0,05$ ). Nesta camada, a Parcela A teve maior teor de C nos microagregados, e na Parcela B houve maior teor de C tanto nos macroagregados quanto nos microagregados. Em relação às parcelas houve efeito nas frações mesoagregados e microagregados, com maiores teores na Parcela A.

**Quadro 3 - Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) nas frações de agregados do solo nas parcelas A (controle) e B (exclusão) do experimento ESECAFLOR, em Caxiuanã, Pará**

Classe de Agregados	Parcela A		Parcela B	
	Carbono (g kg <sup>-1</sup> )		Nitrogênio (g kg <sup>-1</sup> )	
	0,0- 0,1m			
Macro	14,16 ±2,13 Ba	11,60 ±0,43 Aa	1,21 ±0,07 Ca	0,60 ±0,09 Ab
Meso	14,78 ±1,67 Ba	06,76 ±1,40 Bb	0,79 ±0,13 Ba	0,56 ±0,07 Ab
Micro	19,28 ±3,76 Aa	13,40 ±1,41 Ab	1,52 ±0,20 Aa	0,78 ±0,16 Ab
	0,1- 0,2 m			
Macro	16,43 ±0,99 Aa	10,23 ±0,62 Bb	0,73 ±0,12 Ba	0,61 ±0,04 Ba
Meso	08,02 ±0,92 Ca	08,86 ±0,12 Ba	0,62 ±0,09 Ba	0,48 ±0,04 Bb
Micro	12,94 ±0,19 Bb	15,81 ±1,91 Aa	1,17 ±0,12 Aa	0,77 ±0,05 Ab
	0,2- 0,3 m			
Macro	13,81 ±2,34 ABa	12,84 ±1,06 Aa	0,66 ±0,08 Ba	0,58 ±0,06 Ba
Meso	11,38 ±1,57 Ba	08,19 ±0,95 Bb	0,47 ±0,06 Ca	0,46 ±0,03 Ba
Micro	14,82 ±1,68 Aa	14,26 ±0,73 Aa	0,82 ±0,10 Aa	0,78 ±0,12 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna (frações) e minúscula na linha (parcelas), em cada camada, não diferem entre si pelo teste Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Dos autores (2022).

Os teores de C nos agregados do solo na camada de 0,1- 0,2 m sofreram influência da interação fração de agregado e parcela ( $p = < 0,001$ ). Nesta camada, o teor de C foi maior



nos macroagregados e menor nos mesoagregados na Parcela A. Já na Parcela B, o teor de C foi maior nos microagregados em relação às demais frações. Comparando-se as parcelas, houve efeito entre teor de C nos macroagregados (maior teor na Parcela A) e nos microagregados (maior teor na Parcela B).

Os teores de C nos agregados do solo na camada de 0,2 - 0,3 m sofreram influência da interação fração de agregado e parcela ( $p = 0,04$ ). Os maiores teores de C tanto na Parcela A como na Parcela B ocorreram nos macroagregados e microagregados. Em relação às parcelas, houve efeito apenas para mesoagregados com maior teor de C na Parcela A.

Os teores de N nos agregados do solo na camada de 0,0 - 0,1 m sofreram influência da interação fração de agregado e parcela ( $p = 0,003$ ). Nesta camada, a parcela A teve maior teor de N nos microagregados, e o menor teor nos macroagregados. Na Parcela B não houve diferença entre as frações. Em relação às parcelas houve maior teor de N na Parcela A em todas as frações de agregados.

Na camada 0,1-0,2 m, ambas as parcelas tiveram maior teor de N nos microagregados. Comparando-se as parcelas, houve efeito para mesoagregados e microagregados com maiores teores de N na Parcela A. Na camada 0,2 - 0,3 m só houve efeito entre as frações em cada Parcela ( $p = < 0,001$ ), com maiores teores de N nos microagregados.

## Discussão

### Estoque de COT e nutrientes no solo

A redução da umidade no solo diminuiu o estoque de C em 38,12% na Parcela B. Em estudo anterior na mesma área, Sotta *et al.* <sup>(4)</sup> haviam reportado menor teor de C na Parcela A (11,7 g kg<sup>-1</sup> contra 9,10 g kg<sup>-1</sup> na camada 0-10 cm e 10,1 g kg<sup>-1</sup> contra 8,80 g kg<sup>-1</sup> na camada 10-25 cm). Costa *et al.* <sup>(12)</sup> relataram a redução da produção de serrapilheira na parcela sob efeito de seca. Outro estudo revelou que a redução da fotossíntese das árvores tornou a respiração heterotrófica do solo uma fonte líquida de C <sup>(16)</sup>. Esses resultados sugerem que o efeito da seca prolongada sobre a floresta compromete as entradas de C no sistema solo.

A exclusão de água na parcela B não influenciou no estoque de nitrogênio no solo. Os resultados obtidos em Caxiuanã são bem inferiores aos observados por Magalhães *et al.* <sup>(5)</sup> na floresta nativa em Rondônia (>4 Mg ha<sup>-1</sup>). De fato, menores teores de N foram relatados por Malhi *et al.* <sup>(17)</sup> tanto nos solos de Caxiuanã (0,13%) em relação a floresta no Tapajós (0,17%), como nas folhas (Caxiuanã: 19,8 mg g<sup>-1</sup>) (Tapajós: 22,9 mg g<sup>-1</sup>). Vitousek <sup>(18)</sup> afirmou



que a maioria das florestas tropicais de terras baixas não possui economias de nitrogênio eficientes no solo, sendo bastante afetadas pela rápida taxa de decomposição do litter. É provável que a menor decomposição na Parcela B e maiores entradas de N na Parcela A tenham influenciado nos resultados encontrados.

Os maiores estoques de P na Parcela B podem estar associados aos problemas associados ao transporte de P no solo. O elemento P tem baixa mobilidade no solo e o principal mecanismo de transporte e absorção é a difusão, que é influenciada por vários fatores, como o conteúdo volumétrico de água no solo. Dessa forma, a Parcela B parece apresentar mais dificuldades para transportar o elemento, acumulando-o na fração lábil do solo. Maiores teores de P na Parcela B também foram citados por Sotta *et al.* <sup>(4)</sup>. No geral, os baixos estoques de P encontrados neste estudo estão relacionados a natureza sesquioxídica do Latossolo da área, onde ocorre fixação do P nos minerais que contém Fe e Al, tornando-o insolúvel e indisponibilizando-o para absorção, conforme relataram Guerreiro *et al.* <sup>(11)</sup>.

O acúmulo de K na parcela B também pode ter relação com o transporte do elemento na solução do solo. K tem alta mobilidade e na parcela A certamente sofre mais lixiviação do que na Parcela B. Além disso, certamente a absorção de K é maior na Parcela A, pois maior umidade do solo favorece a difusão do K, aumentando a disponibilidade deste elemento para as plantas <sup>(19)</sup>. Ressalta-se que a disponibilidade de K é baixa no solo e na biomassa da floresta <sup>(17)</sup>.

O efeito observado para o estoque de Ca observado na camada 0,0-0,1 m está associado à maior presença de matéria orgânica do solo nesta camada e a grande quantidade deste elemento na serapilheira presente na superfície do solo. Malhi *et al.* <sup>(17)</sup> relataram alta concentração de Ca, cerca de 3,87 mg g<sup>-1</sup>, nas folhas das espécies florestais de Caxiuanã. O maior estoque de Mg na Parcela B em todas as camadas avaliadas é também reflexo da menor disponibilidade de água.

### **Massa de classes e teores de C e N dos agregados.**

Em relação à distribuição dos agregados por classes de diâmetro, a maior quantidade de macroagregados na Parcela A nas camadas 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m em relação a parcela B reflete alterações ocorridas nos mecanismos de formação e estabilização de agregados em consequência da redução da disponibilidade hídrica no solo sob a Parcela B, sobretudo nas



camadas mais superficiais onde há maior distribuição de sistema radicular e acúmulo de matéria orgânica. Maior quantidade de macroagregados também foi observado em solos de floresta por Campos *et al.* <sup>(20)</sup>.

Em ambiente sem nenhum tipo de alteração (ex. floresta nativa), o solo organiza-se ao longo do tempo em uma estrutura bem definida pela sua composição granulométrica, química e atuação dos agentes biológicos, subordinados às condições ambientais em que o solo está inserido <sup>(21)</sup>. Assim, a redução da umidade do solo afeta a formação de agregados estáveis por alterar o funcionamento biológico do solo, que está diretamente relacionado à agregação. O maior percentual de mesoagregados na Parcela B é um resultado que está associado à redução da quantidade de macroagregados nesta parcela.

O desenvolvimento das raízes das plantas também interfere na formação de agregados <sup>(22)</sup>. Estudo publicado por Metcalfe *et al.* <sup>(23)</sup> comprovou que a redução na disponibilidade de água aumenta o comprimento de raízes, porém reduz significativamente a sua biomassa. As raízes liberam exsudatos que impulsionam a atividade da microbiota do solo, e além disso os exsudatos orgânicos funcionam como agentes cimentantes das partículas do solo, contribuindo para a formação de agregados. Essas informações reforçam a hipótese da redução de macroagregados na Parcela B.

Diversos trabalhos citam a classe de macroagregado como sendo a que mais contém C em áreas nativas devido à estabilidade que o ambiente se encontra, mas esse resultado não foi constatado neste estudo. No entanto, nos solos de Caxiuanã as partículas minerais parecem ser mais decisivas na agregação do solo do que a matéria orgânica. O acúmulo de C e N nos microagregados na camada mais superficial e subsuperficial em ambas as parcelas, pode ser explicado pela característica de solo com avançada idade geológica, altamente intemperizado, típico de Latossolos, onde a quantidade de minerais primários facilmente intemperizáveis é reduzida <sup>(24)</sup>.

Ao avaliarem carbono em agregados do solo sob vegetação nativa e outros sistemas, Costa Junior *et al.* <sup>(15)</sup> constataram que a classe microagregados foi a que mais protegeu o C contra decomposição e, portanto, acumulando este elemento em maiores quantidades em relação às outras classes. Os autores afirmaram ainda que essa classe pode ser uma das primeiras a acumular o elemento, com posterior formação de agregados maiores e oclusão de C.

A susceptibilidade do C contido nos macroagregados em sofrer transformações é maior no solo sob estresse hídrico, pois os mecanismos de formação dessas frações são mais



associados a formas orgânicas mais lábeis, que por sua vez, estão diretamente relacionadas ao teor de umidade do solo. Segundo Golchin *et al.* <sup>(25)</sup> a redução da disponibilidade de C orgânico reduz a atividade microbiana ao redor dos fragmentos de plantas e colônias de bactérias, e conseqüentemente, os macroagregados são transformados em microagregados. Essas informações justificam os maiores teores de C e N nos microagregados.

Os maiores teores de C e N nas frações de agregados na Parcela A estão relacionados à maior atividade microbiana presente na parcela <sup>(26)</sup>, principalmente na camada mais superficial. A quantidade de serapilheira depositada na superfície contribui para esse processo, tanto que outros autores têm associado maiores teores de C nos agregados presentes nas camadas mais superficiais <sup>(15)</sup>.

### Considerações Finais

O experimento de seca de longa duração na floresta resultou em alterações significativas nos estoques de carbono orgânico e nutrientes no solo. Os maiores estoques de nutrientes obtidos na parcela com exclusão da água da chuva são reflexos diretos do déficit hídrico nos processos de transporte e transformação desses elementos no ambiente edáfico. Os maiores estoques de carbono na parcela referência, ou seja, tratamento controle, refletem a dinâmica desse elemento na ciclagem biogeoquímica da matéria orgânica, processo este vital para a manutenção da biomassa aérea da floresta tropical úmida amazônica. Apenas o estoque de nitrogênio não mudou entre as parcelas envolvidas no experimento, o que demonstra que esse elemento possui dinâmica de transformação distinta em relação aos demais nutrientes, provando que o seu acúmulo e/ou transformação é menos dependente da presença ou ausência da água no sistema solo. A seca induzida na floresta afetou os mecanismos de formação e estabilização de agregados no solo e os microagregados representaram importante dreno de C e N nas condições apresentadas neste estudo. Conclui-se que o ecossistema florestal ainda apresenta capacidade de manutenção dos processos ecológicos edáficos mesmo após 14 anos sob condições de estresse hídrico.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Museu Paraense Emílio Goeldi/Estação Científica Ferreira Penna pelo apoio cedido para realização das coletas de solo, logística de transporte e



realização de análises laboratoriais. Agradecem a Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Estado do Pará (Fapespa) e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA pelo apoio financeiro via bolsa de doutorado (Acordo de Cooperação Técnico e Financeiro nº 005/2014). Agradecem também ao projeto: ESECAFLOR/LBA/MCTI/CNPq/FNDCT, processo 457914/2013-0 pela disponibilização das parcelas experimentais e manutenção da estrutura local.

### Referências

1. Marengo JA, Souza CM, Thonicke K, Burton C, Halladay K, Betts, R.A. et al. Changes in climate and land use over the Amazon region: current and future variability and trends. *Front. Earth Sci.* 2018;6, 228. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>
2. Meir P, Wood TE, Galbraith DR, Brando PM, Costa ACL, Rowland L, Ferreira LV. Threshold responses to soil moisture deficit by trees and soil in tropical rain forests: Insights from field experiments. *Biosci.* 2015;65(9):882–92. <https://doi.org/10.1093/biosci/biv107>
3. Buscardo E, Souza RC, Meir P, Geml J, Schmidt SK, Costa ACL, Nagy L. Effects of natural and experimental drought on soil fungi and biogeochemistry in an Amazon rain forest. *Commun Earth Environ.* 2021;2(55):1-12. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00124-8>
4. Sotta ED, Veldkamp E, Schwendenmann L, Guimarães BR, Paixão RK, Ruivo MLP, et al. Effects of an induced drought on soil carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) efflux and soil CO<sub>2</sub> production in an eastern Amazonian rainforest, Brazil. *Global Change Biol.* 2007;13(10):2218-29. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01416.x>
5. Magalhães SSA, Weber OLS, Santos CH, Valadão FCA. Estoque de nutrientes sob diferentes sistemas de uso do solo de Colorado do Oeste-RO. *Acta Amaz.* 2013;43(1):63-72. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000100008>
6. Johnson CM, Vieira ICG, Zarin DJ, Frizano J, Johnson AH. Carbon and nutrient storage in primary and secondary forests in eastern Amazônia. *For. Ecol. Manag.* 2001;147(2):245-52. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00466-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00466-7)
7. Rabot E, Wiesmeier M, Schlüter S, Vogel HJ. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma.* 2018;314(15):122-37. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
8. Tisdall JM, Oades JM. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 1982;33(2):141-63. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>
9. Silva Junior JA, Costa ACL, Azevedo PV, Costa RF, Metcalfe DB, Gonçalves PHL, et al. Fluxos de CO<sub>2</sub> do solo na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará, durante o experimento



ESECAFLOR/LBA. Rev. Bras. Meteorol. 2013;28(1):85-94. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000100009>

10. Bittencourt PRL, Oliveira RS, da Costa ACL, Giles AL, Coughlin I, Costa PB, et al. Amazonia trees have limited capacity to acclimate plant hydraulic properties in response to long-term drought. Glob Chang Biol. 2020;26(6):3569-3584. doi: 10.1111/gcb.15040.

11. Guerreiro QLDM, Ruivo MDLP, Castro RMS, Amarante CB, Rodrigues HJB, Ferreira OO. Variação sazonal dos atributos químicos de Latossolos em uma área submetida ao estresse hídrico na Amazônia. Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi-Ciênc. Nat. 2016;11(3):329-342. <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v11i3.417>

12. Costa ACL, Metcalfe DB, Doughty CE, Oliveira AAR, Neto GFC, Costa MC, et al. Seasonality of ecosystem respiration and net primary productivity after 8–10 years of experimental drought in an eastern Amazon forest. Plant Ecol. Divers. 2013;7(1):7-24. <http://dx.doi.org/10.1080/17550874.2013.798366>

13. EMBRAPA (Br). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA; 1997. 212p.

14. Ellert BH, Bettany JR. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. Can. J. Soil Sci. 1995;75(4):529-38. <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>

15. Costa Júnior C, Píccolo MDC, Siqueira Neto M, Camargo PBD, Cerri CC, Bernoux M. Carbon in soil aggregates under native vegetation, pasture and agricultural systems in the Brazilian savannah. Rev. Bras. Ciênc. Solo. 2012;36(4):1311-21. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000400025>

16. Doughty CE, Metcalfe DB, Girardin CAJ, Amézquita FF, Cabrera DG, Huasco WH, et al. Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia. Nature. 2015;519(5):78-82. <https://doi.org/10.1038/nature14213>

17. Malhi Y, Aragão LEOC, Metcalfe DB, Paiva R, Quesada CA, Almeida S, et al. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. Global Change Biol. 2009;15(5):1255-74. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01780.x>

18. Vitousek PM. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests. Ecol. 1984;65(1):285-98. <https://doi.org/10.2307/1939481>

19. Oliveira RH, Rosolem CA, Trigueiro RM. Importância do fluxo de massa e difusão no suprimento de potássio ao algodoeiro como variável de água e potássio no solo. Rev. Bras. Ciênc. Solo. 2004;28(3):439-45. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300005p.439-445,2004>.

20. Campos MCC, Sousa ACDS, Carneiro MRS, Brito Filho EGD, Silva JDB, Santos RVD. Vias de formação e classes de agregados em áreas sob floresta e pastagem em Areia, PB.





Rev. Cient. Fac. Educ. Meio Amb. 2022;13(2), 180-191.  
<https://doi.org/10.31072/rcf.v13i2.1109>

21. Vezzani FM, Mielniczuk J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. Rev. Bras. Ciênc. Solo. 2011;35(1):213-23.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000100020>

22. Silva Neto EC, Pereira MG, Fernandes JCF, Neto TDAC. Aggregate formation and soil organic matter under different vegetation types in Atlantic Forest from Southeastern Brazil. Semina: Ciên. Agrár. 2016;37(6), 3927-3939. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n6p3927>

23. Metcalfe DB, Meir P, Aragão LEOC, Costa ACL, Braga AP, Gonçalves PHL, et al. The effects of water availability on root growth and morphology in an Amazon rainforest. Plant Soil. 2008;311(2):189-99. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9670-9>

24. Burak DL, Fontes MPF, Becquer, T. Microagregados estáveis e reserva de nutrientes em Latossolo Vermelho sob pastagem em região de Cerrado. Pesqu. Agropecu. Trop. 2011;41(2): 229-41. <https://doi.org/10.5216/pat.v41i2.8771>

25. Golchin A, Baldock JA, Oades JM. A model linking organic matter decomposition, chemistry and aggregate dynamics. In: Lal R, Kimble J, Follett RF, Stewart BA. eds. Soil processes and the carbon cycle. Boca Raton: CRC Press; 1998. p. 245-66.

26. Matsunaga WK, Rodrigues HJB, Rodrigues PG. Atributos microbiológicos de solo, relacionados às atividades da microfauna em solo na floresta amazônica. Anu. Inst. Geoc. 2018;41(3):630-38. [https://doi.org/10.11137/2018\\_3\\_630\\_638](https://doi.org/10.11137/2018_3_630_638).



10.31072/rcf.v14i1.1242

Este é um trabalho de acesso aberto e distribuído sob os Termos da *Creative Commons Attribution License*. A licença permite o uso, a distribuição e a reprodução irrestrita, em qualquer meio, desde que creditado as fontes originais.



Open Access