

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

CARLA DA PENHA SIMON

Emissão de gases de efeito estufa do solo em áreas de *Blowdown* na
Amazônia Central

Piracicaba

2023

CARLA DA PENHA SIMON

Emissão de gases de efeito estufa do solo em áreas de *Blowdown* na
Amazônia Central

Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Química na Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Plínio Barbosa de Camargo

Piracicaba
2023

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Simon, Carla da Penha

Emissão de gases de efeito estufa do solo em áreas de *Blowdown* na Amazônia Central / Carla da Penha Simon; Plínio Barbosa de Camargo. - - Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2023.

104 p.

Tese (Tese – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, 2023.

1. Amazônia brasileira. 2. Composição isotópica. 3. Dióxido de carbono. 4. Efeito estufa. 5. Fluxo dos gases. 6. Metano. 7. Química do solo. 8. Solo florestal. 9. Vento. I. Título.

CDU 504.7 : 631.41

Elaborada por:

Rubenildo Oliveira da Costa

CRB-8/7946

Resolução CFB Nº 184 de 29 de setembro de 2017

DEDICATÓRIA

Aos meus pais João e Neuza Simon.
Às minhas irmãs Cátia e Camila.
À minha recém-chegada sobrinha Valentina.
Aos meus Amigos Thais Pessoa, Élcio Lacerda e Edney da Vitória.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Á Deus, por ter me permitido chegar até aqui. Por ter permitido que eu aprendesse e convivesse com pessoas extraordinárias, fontes de ensinamentos e experiências pessoais e profissionais.

Aos meus familiares, pelo incentivo e contribuição para a realização dos meus desafios pessoais e crescimento profissional; em especial minha mamãe Neuza Simon e meu papai João Simon, minhas irmãs Camila e Cátia Simon; meu cunhado Digean Tomazini.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Plínio B. Camargo, meu prof. querido, grande parceiro de empreitadas, campo e experiências pessoais; grande expoente do aprendizado nesses últimos anos.

Ao LEI/CENA/USP - Laboratório de Ecologia Isotópica (minha casa na Esalq), na pessoa do Prof. Zebu, grande responsável pela excelente convivência e carinho, com o qual somos acolhidos desde o momento em que chegamos ao Laboratório.

Aos técnicos e colaboradores Fabi, Edmar (Ed), Geraldo (Gera), Antônia (Toninha), Sarah, Prof. Marcelo e Isadora (Isa). Todos vocês foram e são muito importantes em todo meu processo de doutoramento.

A minha grande amiga Thais N. Pessoa, parceira de todas as horas, enfrentamos a pandemia juntas. Foram quase quatro anos de muitas batalhas, conversas, aconselhamento mútuo e desafios. Grande parte do desenvolvimento da minha tese devo a sua iniciativa e comprometimento em me ajudar.

A minha grande amiga Taciana, minha parceira de trabalho, conselheira e ótima companhia. Nossa amizade sai de uma boa convivência para vida.

A minha grande amiga Carolina Ferraz, parceira de campo, parceira das empreitadas com GHG's e matéria orgânica do solo. Minha "*migles*" lutadora, que tanto auxiliou desde as análises até o processamento de dados da minha tese.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa de qualidade, a todos seus colaboradores, pesquisadores e funcionários. Aos companheiros da Estação Experimental de Silvicultura Tropical (EEST - núcleo ZF2). Aos companheiros que me acompanharam no campo Karina, Edgard Tribuzzi, Aldeize, Daisy e Gabriel.

Aos meus sempre orientadores e grandes amigos Élcio G. Lacerda e Edney L. Vitória foram os grandes responsáveis por me motivar, fazendo acreditar que poderia realizar o que eu desejasse. Nunca se esquecendo dessa orientada nesses anos.

Agradeço a agência financiadora CAPES (PROEX-0487), que me concedeu as bolsas de estudo através do programa de pós-graduação, sem as quais não seria capaz de concluir meu trabalho.

Sem as contribuições dessas pessoas incríveis, a minha jornada não seria possível. Deixo meu muito obrigada a todos com muito carinho e um forte abraço de “ursa”.

"O estudo, a busca da verdade e da beleza são domínios em que nos é consentido *sermos crianças por toda a vida.*"

Albert Einstein

RESUMO

SIMON, C. P. **Emissão de gases de efeito estufa do solo em áreas de Blowdown na Amazônia Central**. 2023. 104 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.

Um estudo bibliométrico, na categoria “*science mapping*”, sobre o tema “*wind disturbances*” foi realizado a fim de se encontrar os impactos desses fenômenos causados em solos. De modo geral, foi realizado com o objetivo de melhor compreender os principais resultados com maiores números de trabalhos encontrados foram para a biomassa acima do solo, sendo poucos os que desenvolveram o tema solos que desenvolveram dentro da ciência do solo. Além do desmatamento, fenômenos naturais como *Blowdown* tornam-se cada vez maiores e mais comuns em um dos biomas mais importantes do mundo, a Amazônia. Assim, objetivou-se compreender como áreas onde ocorreram o distúrbio natural *blowdown* alteram os fluxos de gases do efeito estufa (CO₂, CH₄ e N₂O), os atributos físicos e os estoques de carbono e nitrogênio do solo quando comparados com áreas de floresta não perturbada na Amazônia Central. O estudo foi realizado na área da Estação Experimental de Silvicultura Tropical/INPA, vegetação característica Campinarana, com Neossolos Quartzarênicos. As áreas avaliadas foram: floresta não perturbada (VNP) e duas áreas onde ocorreram o Blowdown nos anos de 2005 (BD15) e 2019 (BD1). As coletas de gases foram realizadas na estação chuvosa com câmaras estáticas, utilizando o equipamento *Gasmet através do método de FTIR*. Também foram coletados serapilheira e amostras deformadas e indeformadas de solos, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm, visando avaliar a qualidade e origem da matéria orgânica por determinação da composição isotópica e estoque de carbono do solo. Os fluxos médios totais da campanha para as áreas de BD1, BD15 e VNP foram de 90,4±4,4, 75,6±4,5, 73,0±3,1 C-CO₂ mg m⁻² h⁻¹; 50,2±9,4, 32,2±5,5 e 27,2 N-N₂O µg m⁻² h⁻¹, -33,1±4,3, -15,1±5,2 e -26,2±3,7 C-CH₄ µg m⁻² h⁻¹ respectivamente. Os estoques de C e N considerando-se a camada de 0-50 para BD1, BD15 e VNP foram de 58,6, 64,6 e 92,5 Mg h⁻¹ de C; 4,1, 4,8 e 5,6 Mg ha⁻¹ de N respectivamente. Podemos observar a superioridade da VNP em relação a vários atributos, onde a ausência de queda da floresta mantém o equilíbrio dentro do perfil do solo mantendo as relações entre microrganismos, sistema radicular, a diversidade de fauna e flora em condições de desenvolvimento.

Palavras-chave: Roça de ventos. Solos florestais. Estoque de carbono. Gás carbônico. Metano. Oxido nitroso.

ABSTRACT

SIMON, C. P. **Greenhouse gas emissions from soil in Blowdown areas in Central Amazonia**. 2023. 104 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

A bibliometric study type "*science mapping*", on the topic of "*wind disturbances*" was carried out to find the impacts of these phenomena on soils. In general, the main results with the highest numbers of works found are for above-ground biomass, with few developing the topic soils within the context. In addition to deforestation, natural phenomena such as *blowdowns* become increasingly larger and more common in one of the most important biomes in the world, the Amazon. Thus, we aimed to understand how areas where natural disturbance *blowdown* occurred alter greenhouse gas fluxes (CO₂, CH₄, and N₂O), soil physical attributes, and carbon and nitrogen stocks when compared to undisturbed forest areas in Central Amazon. The study was carried out in the Tropical Forestry Experiment Station/INPA, a characteristic Campinarana vegetation, with sandy textured Latosols. The areas evaluated were undisturbed forest (VNP) plus two areas where *blowdown* occurred in the years 2005 (BD15) and 2019 (BD1). Gas collections were performed in the rainy season with static cameras, with Gasmeter equipment that uses FTIR. We also collected burlap and soil (deformed and undeformed samples) in layers 0-10, 10-20, 20-30, and 30-50 cm, aiming to evaluate the quality and origin of organic matter by determining the isotopic composition and soil carbon stock. The mean total fluxes of the campaign for BD1, BD15 and VNP were 90.3±4.3, 75.6±4.5, 73.0±3.1 C-CO₂ mg m⁻² h⁻¹; 50.2±9.4, 32.2±5.4 and 27.1 N-N₂O μg m⁻² h⁻¹, -33.0±4.3, -15.07±5.2 and -26.1±3.6 C-CH₄ μg m⁻² h⁻¹ respectively. The C and N stocks considering the range 0-50 for BD1, BD15, and VNP were 58.56, 64.56, and 92.5 Mg h⁻¹ of C; 4.1, 4.8, and 5.6 Mg ha⁻¹ of N respectively. The study areas *blowdown* in the Amazon rainforest. Thus, we can observe the superiority of the NPV with several attributes, where the absence of forest fall maintains the balance within the soil profile keeping the relationships between microorganisms, root system, and the diversity of fauna and flora in development conditions.

Keywords: Downburst. Forest soils. Carbon stock. Carbon dioxide. Methane. Nitrous oxide.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquematização da ocorrência de um downburst. Adaptado de Fujita (1978).....	26
Figura 2 - Etapas da revisão bibliográfica.	28
Figura 3 - Produção científica anual sobre distúrbios de ventos em florestas.....	31
Figura 4 - Periódicos mais relevantes (n = 20) conforme a) onde mais são publicados artigos com o tema e b) fator de impacto local (índice H) dos periódicos.	32
Figura 5 - Representação gráfica da aplicação das Lei de Bradford para os artigos publicados com a temática de distúrbios de vento.	33
Figura 6 - Dinâmica cumulativa de publicação dos cinco periódicos que mais publicam sobre o tema.	33
Figura 7 - Trinta Autores mais relevantes conforme a) número de trabalhos publicados b) somatórios da fracionalização do número de autores por artigo.....	34
Figura 8 - Produção dos trinta autores mais relevantes (em termos de número de publicações e total de citações por ano) ao longo do tempo (n = 1.729).	35
Figura 9 - Os vinte Países dos autores correspondentes e colaboração.	36
Figura 10 - Nuvem de palavras com as vinte palavras-chave estabelecidas pelos autores, mais citadas nos documentos (n = 1.729).....	40
Figura 11 – Principais ocorrências das palavras-chave e sua cronologia.	41
Figura 12 - Produção científica anual de artigos com tema central solos no conjunto de artigos sobre wind disturbances	43
Figura 13 - Precipitação mensal do ano de 2020 da estação automática situada em Manaus-AM. Fonte: INMET.....	60
Figura 14 - Área de floresta não perturbada pelo distúrbio de vento.....	61
Figura 15 - Áreas atingidas pelas tempestades convectivas a) Blowdown ocorrido no ano de 2005 b) Blowdown ocorrido no ano de 2020.	62
Figura 16 - a) Operação do Gasmét, b) câmaras para análise de gases instalada para coleta no Gasmét; detalhe da operação do equipamento, em treinamento da doutoranda.	65
Figura 17 - Funis de Haines utilizados durante as análises de macroporosidade e microporosidade, a) estrutura completa b) Funil de Haines em detalhes com uma amostra indeformada correspondente a uma área de <i>Blowdown</i>	69
Figura 18 - Método do permeâmetro de carga constante para estudo da condutividade hidráulica do solo saturado e estrutura com duas entradas acessórias para dois frascos de <i>Mariotte</i> acoplados a uma flauta com saídas de água para aplicação da carga hidráulica.	70
Figura 19 - Processo de a) preparo e montagem das amostras em placa porosa e b) inserção do conjunto de amostras na câmara de pressão de Richards para determinação do ponto de murcha permanente.....	71

Figura 20 - Penetrômetro eletrônico do Laboratório de Física do Solo da ESALQ, utilizado nas determinações de resistência do solo a penetração, ao analisar uma amostra da área de BD1.....	73
Figura 21 - Fluxos médios para os três dias de campanha de campo, realizada em cada área de estudo. Valores médios seguidos do erro padrão, para o fluxo médio dos gases C-CO ₂ , C-CH ₄ e N-N ₂ O emitidos pelo solo. Letras maiúsculas comparação entre diferentes tratamentos no mesmo dia; letras minúsculas comparação entre diferentes dias dentro do mesmo tratamento, de acordo com o teste de Tukey (p>0,05).....	76
Figura 22 - Fluxos médios por horário de coleta durante os dias da campanha de campo. Valores médios seguidos do erro padrão, para o fluxo médio dos gases C-CO ₂ , C-CH ₄ e N-N ₂ O emitidos pelo solo. Letras maiúsculas comparação entre diferentes tratamentos no mesmo dia; letras minúsculas comparação entre diferentes dias dentro do mesmo tratamento, de acordo com o teste de Tukey (p>0,05).	77
Figura 23 - Fluxos médios totais da área de floresta não perturbada (VNP), blowdown ocorrido em 2005 (BD15) e 2019 (BD1). Valores médios seguidos do erro padrão, para o fluxo médio dos gases C-CO ₂ , C-CH ₄ e N-N ₂ O emitidos pelo solo. Letras maiúsculas comparação entre diferentes tratamentos de acordo com o teste de Tukey (p>0,05).....	78
Figura 24 - Temperaturas médias e Espaço Poroso Preenchido Por Água (EPPA) da área de floresta não perturbada (VNP), blowdown ocorrido em 2005 (BD15) e 2019 (BD1).	79
Figura 25 - a)Carbono orgânico total do solo, b)nitrogênio total do solo e os isótopos estáveis de c) ¹³ C e d) ¹⁵ N para vegetação nativa não perturbada (VNP), blowdown com queda em 2019 (BD1) e blowdown com queda em 2005 (BD15). Onde as barras de erro correspondem ao desvio padrão; letras maiúsculas comparação entre diferentes profundidades dentro do mesmo tratamento; letras minúsculas comparação entre diferentes tratamentos na mesma profundidade; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; de acordo com o teste de Tukey (p>0,05).....	82
Figura 26 - Estoques de carbono e nitrogênio considerando o perfil do solo 0 - 50 cm de profundidade, com intervalo de 95 % de confiança para a média.....	85
Figura 27 - Relação C/N dos solos para vegetação nativa não perturbada (VNP), blowdown com queda em 2019 (BD1) e blowdown com queda em 2005 (BD15). Onde as barras de erro correspondem ao erro padrão; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; conforme teste de Tukey a (p>0,05).....	86

- Figura 28 - Densidade do solo determinada para as áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), blowdown com queda em 2019 (BD1) e blowdown com queda em 2005 (BD15). Onde as barras de erro correspondem ao desvio padrão; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; conforme teste de Tukey a 0,05% de probabilidade.....89
- Figura 29 - Resistência a penetração do solo determinada para as áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), blowdown com queda em 2019 (BD1) e blowdown com queda em 2005 (BD15). Onde as barras de erro correspondem ao desvio padrão; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; conforme teste de Tukey a 0,05% de probabilidade.90
- Figura 30 - Representando o espaço poroso do solo foram trabalhadas as seguintes variáveis a) porosidade total do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), b) macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), c) mesoporosidade e d) microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) para as áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), blowdown com queda em 2019 (BD1) e blowdown com queda em 2005 (BD15). Onde as barras de erro correspondem ao desvio padrão; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; conforme teste de Tukey a 0,05% de probabilidade.91
- Figura 31 - Condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) para as áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), blowdown com queda em 2019 (BD1) e blowdown com queda em 2005 (BD15). Onde as barras de erro correspondem ao desvio padrão; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; conforme teste de Tukey a 0,05% de probabilidade.93
- Figura 32 - CAR - Capacidade de ar do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e CAS - Capacidade de aeração do solo (%) para as áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), blowdown com queda em 2019 (BD1) e blowdown com queda em 2005 (BD15). Onde as barras de erro correspondem ao desvio padrão; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento

em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; conforme teste de Tukey a 0,05% de probabilidade..... 94

Figura 33. Capacidade de água disponível do solo (cm cm^{-3}) para as áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), blowdown com queda em 2019 (BD1) e blowdown com queda em 2005 (BD15). Onde as barras de erro correspondem ao desvio padrão; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; conforme teste de Tukey a 0,05% de probabilidade..... 97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações principais encontradas sobre o conjunto total de artigos avaliados.....	30
Tabela 2 - Os dez artigos mais citados conforme as bases de dados WOS e Scopus.	37
Tabela 3 - Os 10 artigos do banco de dados, mais citados no conjunto de artigos do banco de dados.....	38
Tabela 4 - Os vinte artigos mais citados nas referências dos artigos do banco de dados, o número de citações e as citações na plataforma do <i>Google Acadêmico</i>	39
Tabela 5 - Informações principais encontradas sobre artigos com tema central solos no conjunto de artigos sobre wind disturbances.....	42
Tabela 6 - Os dez artigos mais citados conforme as bases de dados WOS e Scopus.	44
Tabela 7 - Autores que trabalharam com solos em áreas de blowdown.	48
Tabela 8 - Granulometria do solo nas áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), <i>blowdown</i> com queda em 2019 (BD1) e <i>blowdown</i> com queda em 2005 (BD15) nas diferentes profundidades.....	63
Tabela 9 - Caracterização química das áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), <i>blowdown</i> com queda em 2019 (BD1) e <i>blowdown</i> com queda em 2005 (BD15).....	64
Tabela 10 - Resultados para as variáveis delta nitrogênio ¹⁵ , delta carbono ¹³ encontradas na análise de serrapilheira, nas áreas de estudo.	80
Tabela 11 - Valores médios seguidos do erro padrão para as variáveis estoque de C e estoque de N do solo. Letras maiúsculas comparação entre diferentes tratamentos na mesma profundidade; letras minúsculas comparação entre diferentes profundidades dentro do mesmo tratamento; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; de acordo com o teste de Tukey ($p>0,05$).....	84
Tabela 12 - Resultados obtidos para ao fracionamento físico da matéria orgânica realizado para duas frações Matéria Orgânica Particulada (MOP) e Matéria Orgânica Associada ao Mineral (MOAM), sendo determinadados o percentual médio de cada fração, carbono orgânico total, nitrogênio total, relação carbono e nitrogênio, e os isótopos estáveis de ¹³ C e ¹⁵ N.	87

Tabela 13 - Resultados obtidos para capacidade de campo ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), seguidas do desvio padrão, para as áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), blowdown com queda em 2019 (BD1) e blowdown com queda em 2005 (BD15). ...	95
Tabela 14 - Resultados obtidos para ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), seguidas do desvio padrão, para as áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), blowdown com queda em 2019 (BD1) e blowdown com queda em 2005 (BD15).	96

SUMÁRIO

1. Introdução Geral	21
Referências	23
CAPÍTULO I - Tendências Globais sobre distúrbios causados por ventos em florestas: um estudo bibliométrico	
3. Introdução	25
2. Material e métodos.....	27
1.2.1 Análise e exploração dos dados	29
3. Resultados	30
3.1 Informações gerais sobre o banco de dados	30
3.2 Informações sobre os periódicos.....	32
3.3 Informações sobre os autores	34
3.4 Informações sobre os artigos	36
3.5 Solos e Wind disturbances.....	42
3.6 Blowdowns e solos.....	47
4. Conclusão	48
Referências	48
CAPÍTULO II – Fluxo médio de gases de efeito estufa do solo em áreas de <i>Blowdown</i> na Amazônia Central.....	
1. Introdução	57
2. Material e métodos.....	59
2.2 Área de estudo.....	59
2.3 Fluxo de gases do solo	64
2.4 Serrapilheira.....	66
2.5 Composição isotópica %C, % N, $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$	66
2.6 Estoque de Carbono e Nitrogênio	67
2.7 Fracionamento granulométrico da MOS do solo.....	67
2.8 Atributos físicos do solo	68
2.9 Densidade do solo	68
2.10 Porosidade do solo	69
2.11 Condutividade hidráulica do solo saturado	70
2.12 Ponto de murcha permanente	71
2.13 Capacidade de campo	71
2.14 Resistência do solo a penetração	72
2.15 Capacidade de aeração do solo e Capacidade de ar do solo.....	73
2.16 Delineamento experimental e análise estatística.....	74

3. Resultados e discussão.....	74
3.2 Gases do solo	74
3.3 Serrapilheira e solos (CN)	80
3.4 Atributos físicos do solo.....	88
4. Conclusão	98
5. Referências	99

1. INTRODUÇÃO GERAL

A preocupação com o aquecimento global e as mudanças climáticas, tendo como temática a redução da emissão de gases do efeito estufa, foi abordada pela primeira vez no Protocolo de Quioto em 1997. Em 2014 o Grupo de Trabalho I do IPCC, embasado cientificamente levantou a seguinte questão: o incremento das concentrações de gases do efeito estufa (GEE's) na atmosfera terrestre fará com que a sociedade tenha que conviver em condições climáticas com mudanças constantes (Ciais et al., 2014). Já o Grupo de Trabalho II, apresentou os impactos, adaptação e vulnerabilidade: trouxe a problemática que as mudanças climáticas possuem consequências perturbadoras e incertas principalmente para a agricultura, abastecimento de água, transporte, comunidades costeiras, economia, energia e ecossistemas (Ciais et al., 2014).

Diante disso, entender a influência antropogênica nas mudanças climáticas conferida pela emissão contínua de GEE's, torna-se um tema de extrema importância. O dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) são os três GEE's mais importantes, amplamente considerados como os principais contribuintes para o aquecimento global.

Cada GEE possui suas particularidades, absorvendo energia solar em grau e forma distintas, a esta absorção chamamos de "Potencial de Aquecimento Global", assim ao estudarmos o comportamento de determinado GEE, podemos convertê-la em uma unidade semelhante, denominada equivalente de dióxido de carbono (IPCC, 2007). A força radiativa de um gás depende de como ele se comporta ao receber radiação eletromagnética de comprimento longo que vem da Terra e da vida do gás na atmosfera. De modo que, uma molécula de CH_4 gera aquecimento a uma intensidade semelhante a 21 moléculas de CO_2 .

Desde a Revolução Industrial, as concentrações de CO_2 , CH_4 e N_2O na atmosfera aumentaram de 280 ppm para 405 ppm, 715 ppb para 1859 ppb e 270 ppb para 329 ppb, respectivamente (WMO, 2018). Em grande parte, devido à aplicação de fertilizantes químicos sintéticos após a era industrial, onde os solos agrícolas tornaram-se uma fonte antropogênica significativa de emissões de GEE's e produziram aproximadamente 20% do total das emissões globais de GEE's (Lokupitiya; Paustian, 2006).

O solo é de grande importância no ciclo global do carbono, sendo o maior reservatório de carbono orgânico na superfície da Terra (Ramin; Allison, 2019). Considerando a profundidade de até um metro estima-se que existam de 1500 a 2000 Pg de C, o que representa valor extremamente significativo quando comparado a atmosfera e a vegetação, em torno de aproximadamente 730 e 470-655 Pg de C, respectivamente; sendo que o estoque de C dos solos considerando-se os a camada superficial de 30 cm é de 800 Pg (Cerri et al., 2004). Assim, é provável que os fluxos de GEE's do solo para a atmosfera possuam um papel significativo, pois trata-se de uma resposta biótica às mudanças climáticas (Ciais et al., 2014; Davidson; Janssens, 2006; Sihi et al., 2020).

Na COP21, iniciativa da Nações Unidas pelas Mudanças Climáticas (UNFCCC) realizada em Paris, os países se comprometeram voluntariamente a promover práticas agrícolas que aumentem os estoques de carbono do solo (Chambers et al., 2016), uma vez que foi reconhecida a necessidade da manutenção e do incremento dos estoques de carbono, como alternativa a mitigação dos GEE's. Conforme IPCC (2014) a emissão dos GEE's (CO₂, CH₄ e N₂O) oriundos dos solos sob diferentes tipos de uso, agricultura e florestas foram os responsáveis por quase um quarto das emissões globais, evidenciando-se a importância do desenvolvimento de estudos que contenham a determinação dos fluxos dos GEE's do solo.

As florestas são de extrema importância para os ciclos biogeoquímicos, dentre elas destaca-se a Floresta Amazônica, atualmente, um fato que vem chamando a atenção é que, embora as florestas tropicais intactas sejam os principais reservatórios de carbono e os principais centros da biodiversidade do planeta (Lewis et al., 2011) sua capacidade de sequestrar carbono das árvores está diminuindo (Hubau et al., 2020).

A Floresta Amazônica vem diminuindo graças as grandes taxas de desmatamento, no ano de 2022 foram aproximadamente 11.568 km² de área da Amazônia Legal Brasileira (ALB) destruída (INPE, 2022). As florestas tropicais são essenciais para a manutenção do clima global, elas podem ser afetadas pelas mudanças climáticas e fenômenos naturais, como *blowdown* (Araújo et al., 2017; Nelson et al., 1994; Marra et al., 2018; Peterson et al., 2019; Santos et al., 2015; Viljur et al., 2022).

Esse tipo de fenômeno natural pode acometer toda a extensão da Floresta Amazônica. As tempestades convectivas como a tempestade que ocorreu em 2005, podem gerar várias clareiras no meio da floresta graças as características desse tipo de evento. O *blowdown* também chamado de roça-de-ventos é um fenômeno onde uma coluna de ar desloca-se no sentido descendente atingindo a superfície do solo, com velocidades de 60 a 270 km h⁻¹, ocasionando a abertura de clareiras.

Referências

ARAÚJO, R. F. et al. Regional distribution of large blowdown patches across Amazonia in 2005 caused by a single convective squall line. **Geophysical Research Letters**, vol. 44, no. 15, p. 7793–7798, 16 Aug. 2017. DOI 10.1002/2017GL073564. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/2017GL073564>>.

CERRI, C. C. et al. A ciência do solo e o seqüestro de carbono. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Boletim Informativo**, v. 29, n. 3, p. 29–34, 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/312136044_A_ciencia_do_solo_e_o_sequestro_de_carbono>.

CHAMBERS, A.; LAL, R.; PAUSTIAN, K. Soil carbon sequestration potential of US croplands and grasslands: Implementing the 4 per Thousand Initiative. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 71, n. 3, p. 68A-74A, 2016.

CHANGE, I. P. O. C. Climate change 2007: the physical science basis: summary for policymakers. **Geneva: IPCC**, p. 104–116, 2007.

CIAIS, P. et al. **Climate Change 2014**. [s.l: s.n.]

DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature**, v. 440, n. 7081, p. 165–173, mar. 2006. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/nature04514>>.

HUBAU, W. et al. Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. **Nature**, v. 579, n. 7797, p. 80–87, 4 mar. 2020. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/s41586-020-2035-0>>.

INPE. **Estimativa de desmatamento na Amazônia Legal para 2022 é de 11.568 km2. 2022.** Available at: https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/sei_01340-009084_2022_72_notatecnica_estimativa_prodes_2022_revisada_lu_lm_27_10_rev_la-002.pdf.

LEWIS, S. L. et al. The 2010 Amazon Drought. **Science**, v. 331, n. 6017, p. 554–554, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1200807>>.

LOKUPITIYA, E.; PAUSTIAN, K. Agricultural Soil Greenhouse Gas Emissions. **Journal of Environmental Quality**, v. 35, n. 4, p. 1413–1427, jul. 2006.

MARRA, D. M. et al. Windthrows control biomass patterns and functional composition of Amazon forests. **Global Change Biology**, vol. 24, no. 12, p. 5867–5881, Dec. 2018. DOI 10.1111/gcb.14457. Disponível em: <<https://bg.copernicus.org/articles/13/1299/2016/bg-13-1299-2016-discussion.html>>.

NELSON, B. W. et al. Forest Disturbance by Large Blowdowns in the Brazilian Amazon. **Ecology**, vol. 75, no. 3, p. 853–858, Apr. 1994. DOI 10.2307/1941742. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.2307/1941742>>.

PETERSON, C. J. et al. Critical wind speeds suggest wind could be an important disturbance agent in Amazonian forests. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v. 92, n. 4, p. 444–459, 1 Oct. 2019. DOI 10.1093/forestry/cpz025. Disponível em: <<https://academic.oup.com/forestry/article/92/4/444/5505403..com/doi/10.1111/gcb.14457.10.5194/BG-13-1299-2016>>.

VILJUR, M. et al. The effect of natural disturbances on forest biodiversity: an ecological synthesis. **Biological Reviews**, v. 97, n. 5, p. 1930–1947, 2022. DOI 10.1111/brv.12876. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/brv.12876>>

RAMIN, K.I., ALLISON, S.D. Carbon Cycle Implications of Soil Microbial Interactions. In: HURST, C. (ed.). **Understanding Terrestrial Microbial Communities**. Cham: Springer, 2019. p. 1-29. (Advances in Environmental Microbiology, 6). https://doi.org/10.1007/978-3-030-10777-2_1 SIHI, D. et al. Simultaneous numerical representation of soil microsite production and consumption of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide using probability distribution functions. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 200–218, 2 jan. 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.14855>>.

SANTOS, L. T. et al. Windthrows increase soil carbon stocks in a central Amazon forest. **Biogeosciences**, v. 13, no. 4, p. 1299–1308, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/BG-13-1299-2016>>.

WMO, G. A. W. The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2015. **WMO Greenhouse Gas Bulletin**, n. 2212018, 2018. Disponível em: <<https://public.wmo.int/en/media/press-release/greenhouse-gas-levels-atmosphere-reach-new-record>>.

2. Tendências Globais sobre distúrbios causados por ventos em florestas: um estudo bibliométrico

2.1. Introdução

O cenário mundial e local nos leva de encontro direto com uma realidade a cada dia mais consolidada por fatos, as mudanças climáticas estão no nosso cotidiano. No Brasil e ao redor do mundo podemos pontuar diversas ocorrências que afetam direta e indiretamente todo tipo de vida existente no planeta. Muitos estudos relacionados com as mudanças climáticas vêm sendo desenvolvidos, compreender o impacto dos danos causados em áreas de florestas também torna-se necessário.

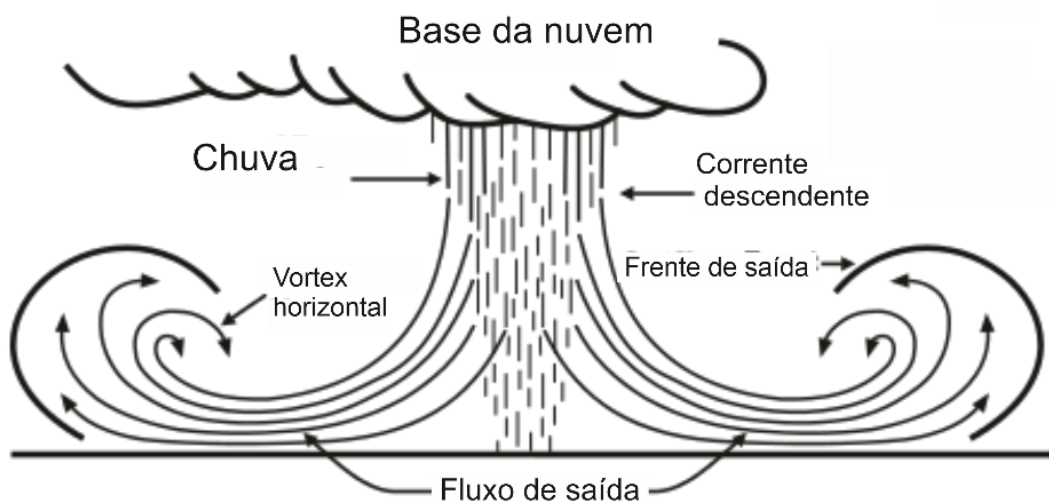
Os distúrbios causados em áreas de floresta natural, especialmente relacionados com o vento merecem destaque, dentre eles os “*windthrow*” ou “*wind disturbances*” gerados por fenômenos como ciclones, tornados, tempestades de ventos, tempestades convectivas, downbursts, microburst, macroburst, entre outros. Assim, este estudo possui como tema os “distúrbios de ventos” em uma abordagem geral, para que se visualize, o grande contexto dinâmico onde estão inseridos os trabalhos com foco em áreas onde predominam tempestades convectivas (downbursts), gerando como resultado o fenômeno conhecido como “*forest blowdown*”.

O primeiro a relatar o fenômeno foi Foster em 1958. Os autores Fujita and Byers (1977) descreveram e inseriram o termo *downburst*, associando o fenômeno a tempestades onde o objetivo era compreender o que estava causando quedas em aviões, principalmente nas decolagens e pousos de baixa altitude, o que ajudou a salvar muitas vidas. Em 1978 Fujita publicou um manual para identificação de downbursts, trazendo em sua publicação esquemas sobre os principais aspectos, além de retratar danos, comparando com os danos ocasionados por tornados. Apenas em 1985, Fujita classificou os fenômenos de downburst em *i*) macroburst (macroexplosão): onde um downburst atinge uma área maior que 4 km, com ventos de até 215 km/h, com duração entre 5 e 30 minutos; *ii*) microburst (microexplosão): onde os danos afetariam áreas menores que 4 km com ventos de até 270 km/h e duração menor que 5 minutos. Essa mesma classificação é usada até aos dias de hoje.

Mais tarde começaram a surgir trabalhos estudando os impactos desses fenômenos dentro de florestas, o reconhecendo como um dos fenômenos mais graves da natureza (Turner et al., 1998; Santos et al., 2016; Negrón-Juárez et al., 2017; Loredo-Souza et al., 2019). Para maiores esclarecimentos quanto aos *blowdowns*, serão abordados a seguir: *i)* gênese do fenômeno e seus aspectos particulares; *ii)* impacto ocasionado em florestas e *iii)* como isso afeta a sociedade global.

O fenômeno é gerado a partir de nuvens cumulonimbus, consideradas as nuvens mais perigosas, as mesmas responsáveis por tempestades, neve, chuvas torrenciais, descargas elétricas, granizo e ventos de elevada intensidade como tornados e downbursts. Os downbursts tem sua origem em uma coluna de afundamento de ar, que ao se chocar com solo vai em linha reta para todas as direções, por isso é chamado de explosão (Figura 1).

Figura 1 - Esquemática da ocorrência de um downburst. Adaptado de Fujita (1978)



Devido as características os downbursts são devastadores dentro de florestas. Garstang et al. (1998) investigaram a ocorrência de downbursts na Bacia Amazônica e concluíram que na região centro-oeste são observados padrões que evidenciam a grande ocorrência desse fenômeno.

O tema central desta tese é capturar o que ocorre com os solos da floresta, em áreas onde ocorreram o fenômeno *blowdown*. Assim, a proposta deste capítulo foi trazer um mapeamento bibliográfico ou “*science mapping*”, contendo informações de extrema relevância para desenvolvimento de projetos e orientação de estudos.

São atribuições deste tipo de pesquisa as descobertas para perguntas como *i)* qual é o periódico mais importante para publicação? *ii)* quais são as publicações mais interessantes, reconhecidas pelos autores da mesma área? *iii)* quais os *gaps* dentro das minhas áreas de estudo e o que esperar de passos futuros? *iv)* como essa temática tem se estruturado social e intelectualmente? *v)* diante da necessidade de internacionalização do conhecimento, juntamente com a ideia de multidisciplinaridade, onde buscar colaboração, quais são os centros de desenvolvimento “de ponta” deste tema?

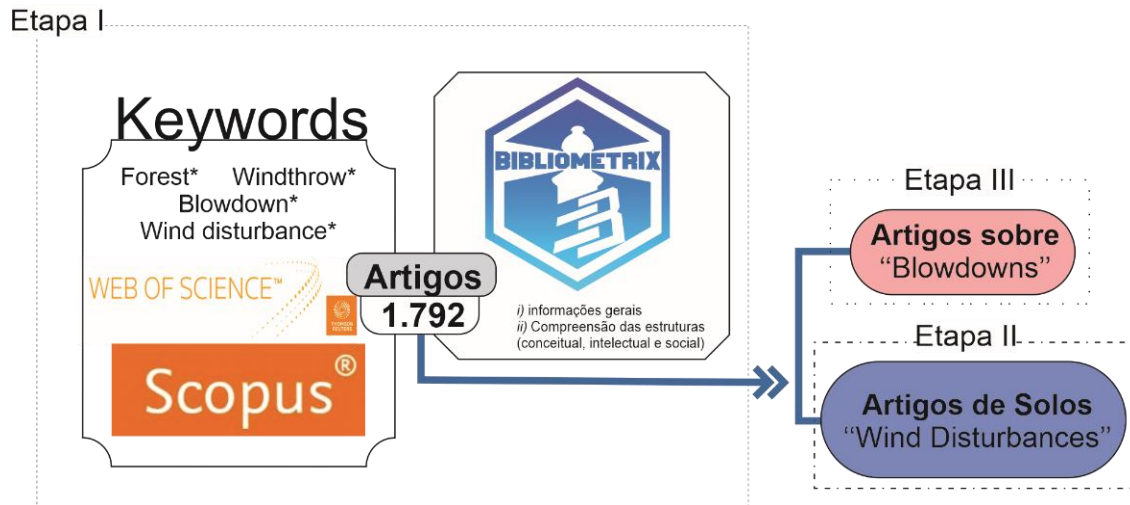
Assim, o objetivo foi compreender a motivação das pesquisas que se dedicam ao estudo de distúrbios causados pelos ventos ao redor do mundo. Reconhecendo-se sua relevância, principais autores e periódicos envolvidos no processo. De modo a apresentar um panorama geral das publicações científicas com o tema levantando assim a sua evolução, novas tendências e lacunas nos estudos em áreas de *blowdown*.

2.2. Material e métodos

Neste estudo as técnicas de pesquisa bibliométrica foram empregadas para compreensão sobre como os distúrbios de ventos são investigados. Foram levantados artigos de revisão (*peer review*), selecionados nas bases *Web of Science* (WOS) e *Scopus*. A busca foi baseada nos campos título, abstract e palavras-chave, seguindo a combinação de palavras e operadores lógicos: {"*forest**" and ("*windthrow**" or "*blowdown**" or "*wind disturbance**")}, e foram encontrados ao todo 1.792 artigos.

Conforme a Figura 2, este estudo foi dividido em três etapas: *i)* panorama geral sobre os estudos desenvolvidos de distúrbios causados por ventos em florestas; *ii)* estudos cuja temática principal é a avaliação dos solos em distúrbios causados por ventos em florestas; e *iii)* estudos sobre solos em áreas onde ocorreram *blowdowns*.

Figura 2 - Etapas da revisão bibliográfica



Para estabelecimento dos artigos da Etapa II a pesquisa inicial foi filtrada novamente nos sites das bases de dados, com a adição da busca pela palavra “soil*” no campo título, sendo encontrados nas bases de dados 105 artigos. Um filtro manual para o conjunto de artigos da Etapa II (n = 105), foi estabelecido para selecionar apenas artigos que abordassem exclusivamente o distúrbio de vento conhecido como *blowdown*, ocasionado por tempestades convectivas, e assim foram selecionados 11 artigos.

O total de artigos foi checado manualmente para que se fosse verificado o tipo de fenômeno que ocorreu na área de estudo, a fim localizar os estudos que foram desenvolvidos em áreas onde ocorreram downbursts.

Reconhece-se que desenvolver o estudo com apenas duas bases de dados, compreendendo apenas artigos revisados aos pares, limitaram a busca por não poderem ser apreciadas teses, dissertações, monografias, publicações em eventos de todas as naturezas. Mesmo assim, os achados neste estudo são de vital importância como ponto de partida para compreender melhor como a temática vem sendo desenvolvida. Além disso, torna-se possível encontrar as lacunas no conhecimento, trazendo novas possibilidades de trabalho.

2.2.1. Análise e exploração dos dados

Os dados foram analisados com o pacote do R *bibliometrix* (Aria e Cuccurullo, 2017). As informações extraídas foram previamente verificadas, antes das operações nos softwares, vários problemas de validação e revisão são comumente encontrados em bancos de dados grandes, como este banco de dados proposto para a temática inicial “*wind disturbances*”. Dentre os problemas estão duplicatas de nomes de autores, campos não preenchidos, diferentes nomes para uma mesma instituição de ensino ou pesquisa (afiliações), nomes de periódicos, foram minuciosamente checados e corrigidos.

O estudo bibliométrico deste tema buscou principalmente obter: *i)* informações gerais (periódicos, autores e sobre o documento) *ii)* Compreensão das estruturas do conhecimento (conceitual, intelectual e social).

i) Métricas sobre as informações gerais:

O Índice de Colaboração (IC) é calculado pela razão entre Total de Autores de Artigos de Autoria Múltipla pelo Total de Artigos de Autoria Múltipla (Elango; Rajendran, 2012; Koseoglu, 2016). Em outras palavras, o Índice de Colaboração é um índice de Coautores por Artigo calculado apenas usando o conjunto de artigos de autoria múltipla. Cálculo do índice de colaboração (Elango; Rajendran, 2012; Koseoglu, 2016) (equação 1).

$$\text{Índice de colaboração} = \frac{\sum \text{n de autores em artigos de multiplaautoria}}{\text{Artigos com multiautoria}} \quad (\text{equação 1})$$

O índice H local é determinado a partir das citações dentro da base de dados do estudo.

O cálculo de fracionalização consiste no somatório da razão entre 1 e o número de coautores por artigo.

2.3. Resultados

2.3.1. Informações gerais sobre o banco de dados

Os trabalhos levantados compreendem publicações relacionadas com o tema distúrbios de ventos em florestas nos últimos sessenta e dois anos. Retratando os principais interesses dos pesquisadores, a taxa de publicações anual equivale a 12 artigos por ano. Os dados referentes a relevância dos artigos, presentes no banco de dados, indicaram que, ao todo, esses trabalhos foram citados em torno de 56 mil vezes nas bases, o que corresponde a uma média de 938 citações por ano (Tabela 1).

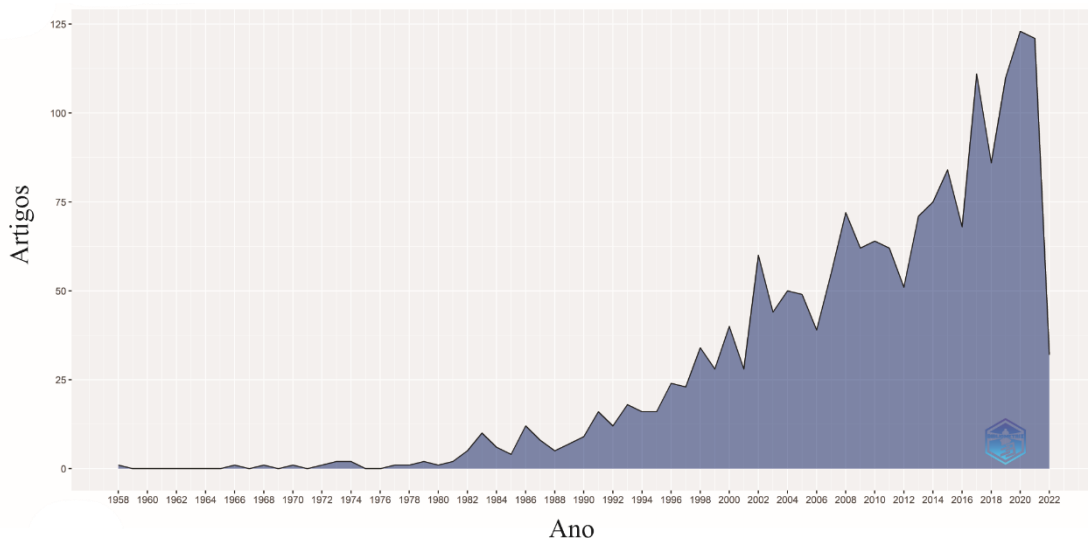
Tabela 1 - Informações principais encontradas sobre o conjunto total de artigos avaliados.

Descrição	Resultado
	1958 á
Período correspondente a pesquisa	2022
Periódicos	401
Número de documentos avaliados	1.792
Publicação média anual	12,2
Média de citações por artigo	30,82
Total de citações dos artigos	56.282
N. total de referências citadas	75.103
Tipos de artigos avaliados	
Artigos	1.704
Artigos de revisão	88
Itens dos artigos	
Palavras-chave (<i>Keywords Plus</i>)	6.725
Palavras-chave do autor (<i>Author's Keywords</i>)	4.254
Autores	
Autores	4.280
Aparições de autor	6.891
Autores de artigos com um único autor	166
Autores de artigos com vários autores	4.114
Colaboração entre autores	
Artigos com um único autor	208
Artigo por autor	0,427
Autores por artigo	2,34
Coautores por artigo	3,87
Índice de Colaboração	2,54

Dentre os tipos de artigos avaliados as revisões correspondem a 4,8 % dos artigos carregados das bases de dados. Ao todo foram listados 4.280 autores, ocupando 6.891 posições em 1.792 artigos. A colaboração entre autores também foi retratada em coautores por artigo, que corresponde a razão entre aparições de autores e número de documentos a uma taxa de 3,87 (Tabela 1).

De modo geral observa-se um crescimento exponencial na publicação de artigos abordando o tema, nos últimos 10 anos foram produzidos 757 artigos, o que representa 42% da produção total (Figura 3). Existem muitos trabalhos extremamente relevantes que devem ser levados em consideração, independente do seu ano de publicação, no entanto recomenda-se fazer uso em revisões e publicações os documentos dos últimos 5 anos, neste caso os trabalhos representam 27% da produção total na área temática.

Figura 3 - Produção científica anual sobre distúrbios de ventos em florestas

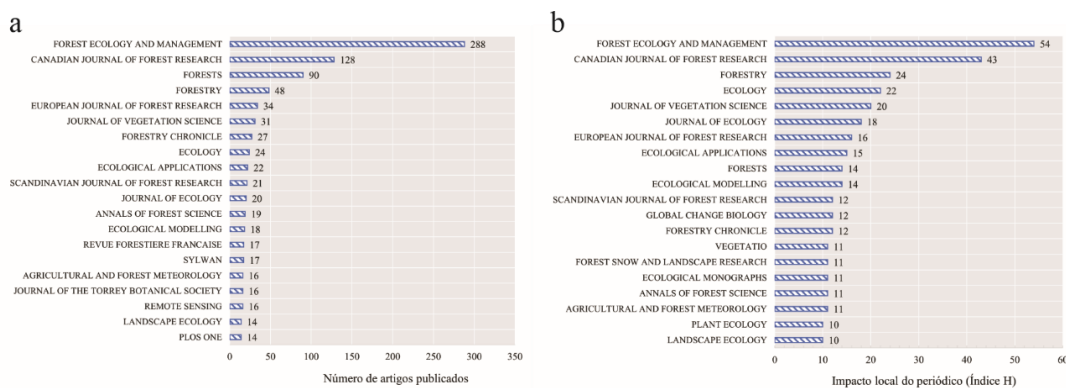


Um dos aspectos mais abordados dentro dos trabalhos é a ligação entre as mudanças climáticas e as ocorrências de distúrbios florestais. Além disso, os avanços tecnológicos possibilitaram acesso a estas áreas por exemplo via sensoriamento remoto, que permitiu identificar principalmente onde ocorreram esses distúrbios.

2.3.2. Informações sobre os periódicos

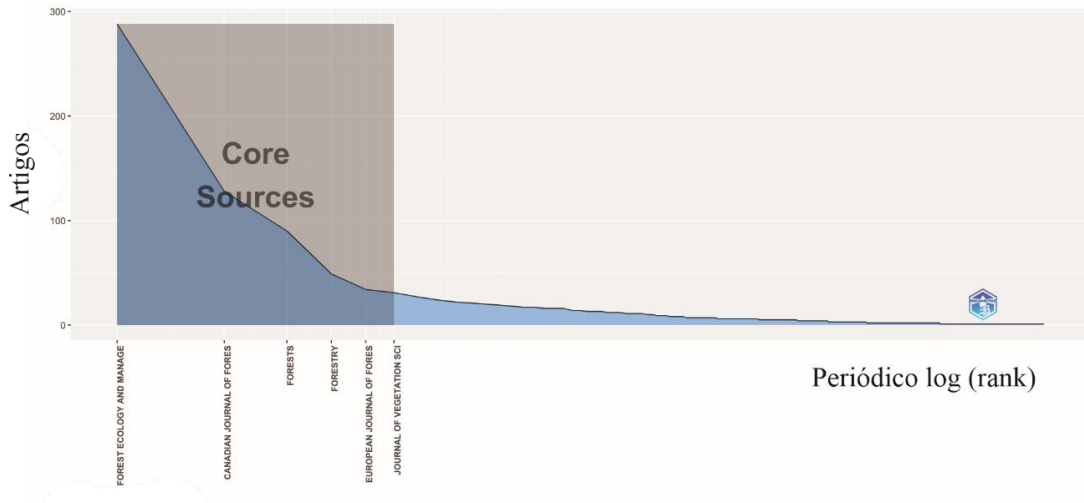
Os periódicos onde são encontrados os artigos são de vital importância para que os achados na pesquisa sejam lidos pelo público-alvo. O periódico *Forest Ecology and management* destaca-se tanto em número de publicações 288 (Figura 4a), quanto no índice H local de 54 pontos (Figura 4b). O índice H local é calculado com base nos dados da pesquisa (n = 1.792 artigos).

Figura 4 - Periódicos mais relevantes (n = 20) conforme a) onde mais são publicados artigos com o tema e b) fator de impacto local (índice H) dos periódicos



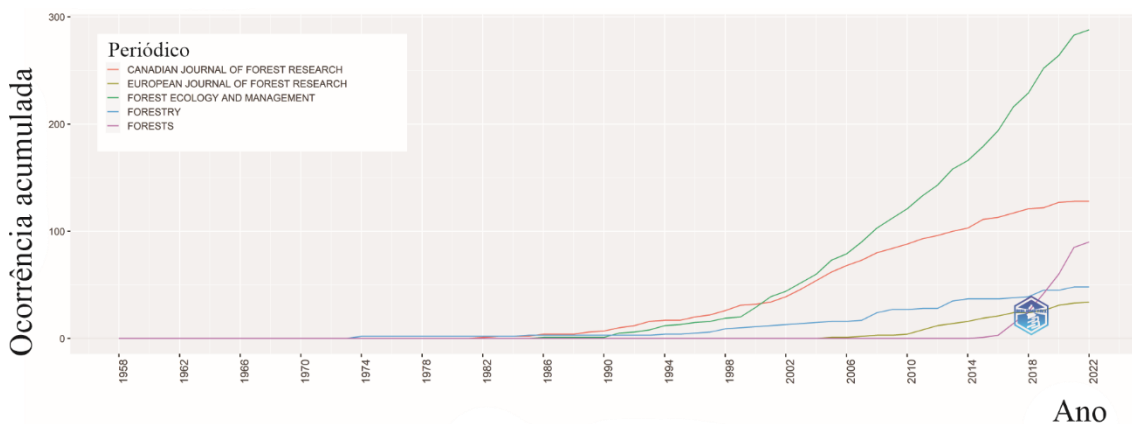
A Lei de Bradford afirma que se arranjados os periódicos em ordem decrescente, a partir do número de artigos publicados, estratificando em três zonas; será encontrada como resultado a “core zone”, “middle zone” e “minor zone”. Os periódicos mais focados no tema de estudo estão dentro da “core zone”. O estudo compreende ao todo 401 periódicos, destes apenas 6 fazem parte da “core zone” para wind disturbances sendo: *Forest Ecology and Management*, *Canadian Journal of Forests*, *Forests*, *Forestry*, *European Journal of Forests* e *Journal of Vegetation Science* (Figura 5). Esse grupo de periódicos foi responsável por 35% das publicações com o tema, evidenciando assim sua importância.

Figura 5 - Representação gráfica da aplicação das Lei de Bradford para os artigos publicados com a temática de distúrbios de vento



A dinâmica cumulativa das publicações indica o periódico *Forest Ecology and Management* pode ser considerado o mais relevante, nos últimos 20 anos tem sido a periódico que mais publica sobre o tema (Figura 6). Uma outra característica importante é o fator de impacto dos periódicos *Forest Ecology and Management*, *Canadian Journal of Forests*, *Forests*, *Forestry*, *European Journal of Forests* e *Journal of Vegetation Science*, com valores de: 3,558, 1,991, 2,634, 2,047, 2,617 e 2,698 respectivamente.

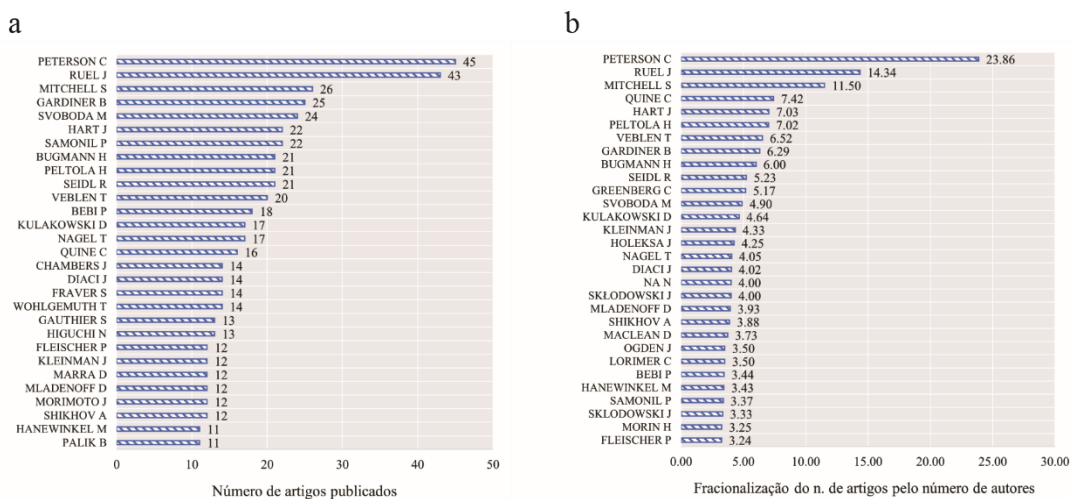
Figura 6 - Dinâmica cumulativa de publicação dos cinco periódicos que mais publicam sobre o tema



2.3.3. Informações sobre os autores

Dentre os autores mais importantes conforme os achados estão Peterson e Ruel, aparecendo com autores de 45 e 43 artigos, respectivamente (Figura 7a). Assumindo que cada autor possui contribuição uniforme quando falamos em coautoria; é possível quantificar a contribuição individual por autor em cada artigo, trazendo sua relevância (Figura 7b). Esse tipo de inferência traz à tona temas atuais, de cunho ético, como a participação dos autores em documentos e a suas contribuições.

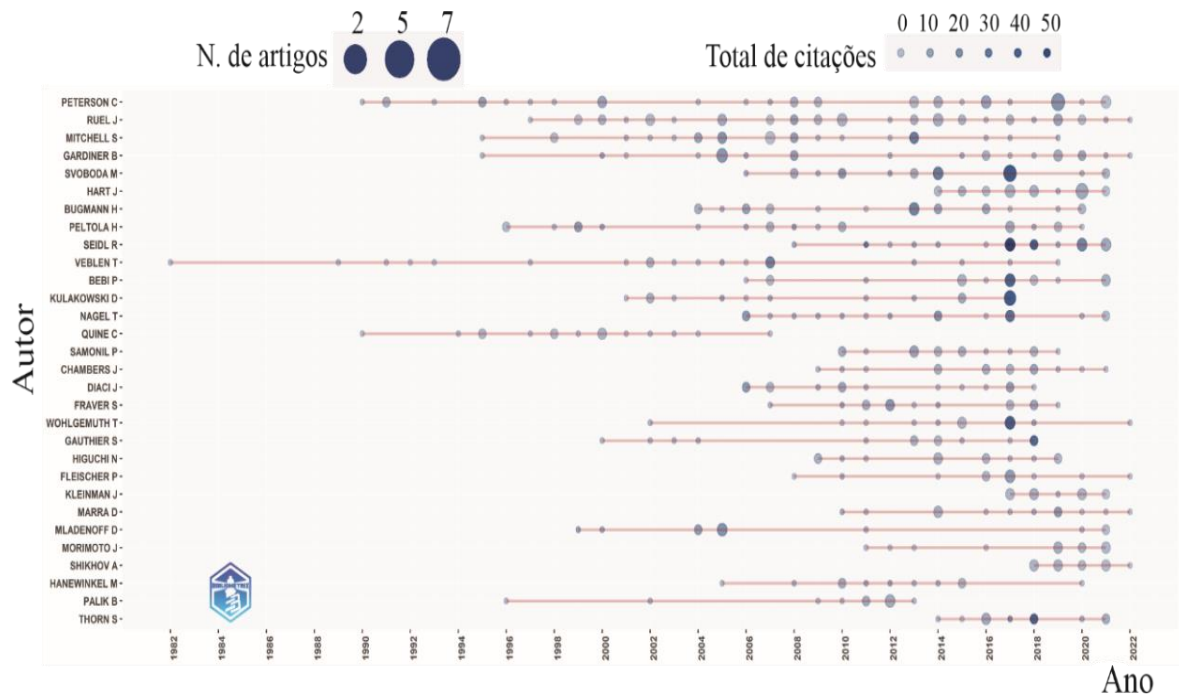
Figura 7 - Trinta Autores mais relevantes conforme a) número de trabalhos publicados b) somatórios da fracionalização do número de autores por artigo



A Figura 8 permite inferir sobre o tempo de produção dos trinta autores mais relevantes, distribuindo sua produção e número de citações ao longo dos anos, o que traz a ideia da construção da carreira do autor, dentro do tema de estudo. Além de identificar a atividade dos autores na área, os autores ativos contribuindo neste ano de 2022, como por exemplo Ruel, Michell, Wohlgemuth, Marra, Fleischer, Morimoto e Shikhov. Nota-se que os anos de 2017 e 2018, particularmente tiveram os maiores índices de citações para alguns autores (Figura 8), isso se deve principalmente pela ocorrência de catástrofes naturais geradas por ventos, que acometeram principalmente os EUA no ano de 2017. O ano de 2017 é considerado o ano mais caro para os norte-americanos em termos de desastres (furacões

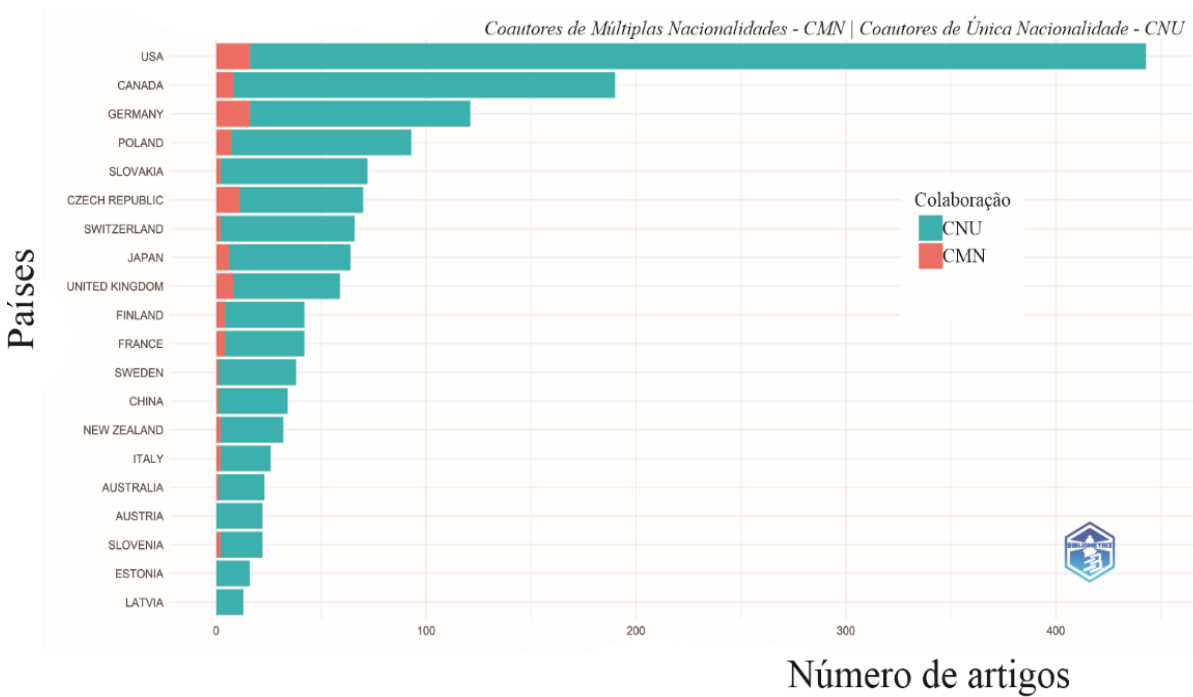
Harvey, Irma e Maria). Autoridades (NOAA e Governo Federal) estimam que os prejuízos chegaram a 306 bilhões de dólares, além disso, conforme a Figura 9, os EUA foi o país que mais produziu sobre o tema.

Figura 8 - Produção dos trinta autores mais relevantes (em termos de número de publicações e total de citações por ano) ao longo do tempo (n = 1.729)



Com base nos autores correspondentes, o país de origem de cada artigo foi determinado através das suas afiliações. De modo similar os coautores de cada documento também foram verificados quanto ao país de origem para determinar o grau de colaborações entre países. Assim observamos no gráfico de barras empilhadas, em rosa os artigos que foram publicados com ao menos a colaboração de um coautor estrangeiro (Figura 9). Os países que mais possuem trabalhos em colaboração são EUA, Alemanha e República Checa com 15, 15 e 10 % do número de artigos respectivamente.

Figura 9 - Os vinte Países dos autores correspondentes e colaboração



2.3.4. Informações sobre os artigos

Uma das formas de mensurar a relevância do artigo é a visualização do número de pessoas que o citam em seus estudos. Muitas obras são essenciais para o desenvolvimento de pesquisa de ponta, na Tabela 2 podemos visualizar, os artigos ($n = 1.729$) ordenados pelo número total de citações nas bases de dados estudadas. Estas publicações possuem entre 60 e 10 anos, quando se observa o número de citações ao ano (NTC/ANO) os artigos mais relevantes são Roy et al. (2012) e Seidl et al. (2011) com 48 e 28 citações ao ano.

Tabela 2 - Os dez artigos mais citados conforme as bases de dados WOS e Scopus

Autoria	NTC	NTC/ANO	NTC normalizada	DOI [link]
White et al., 1979	666	15.1	2.0	10.1007/BF02860857
Heinselman et al., 1973	654	13.1	1.9	10.1016/0033-5894(73)90003-3
Franklin et al., 1987	612	17.0	5.1	10.1007/BF02275261
Laurance et al., 1998	543	21.7	8.5	10.1890/0012-9658(1998)079[2032:RFFATD]2.0.CO;2
Roy et al., 2012	529	48.1	15.9	10.1016/j.ufug.2012.06.006
Everham et al., 1996	511	18.9	9.7	10.1007/BF02857920
Ulanova et al., 2000	354	15.4	5.3	10.1016/S0378-1127(00)00307-8
Greene et al., 1999	344	14.3	4.8	10.1139/cjfr-29-6-824
Seidl et al., 2011	336	28.0	8.8	10.1111/j.1365-2486.2011.02452.x
Frelich et al., 1991	329	10.3	3.7	10.2307/1943005

NTC: número total de citações; *NTC/ANO*: número total de citações por ano; *NTC normalizada*: número total de citações por ano.

Seidl et al. (2011) buscaram enunciar as perturbações em ambientes florestais na Europa, neste estudo os autores atribuíram os desastres às mudanças climáticas, elegendo-as como principais agentes causadores da atual intensificação de ocorrências. Os autores concluíram que quando dos eventos perturbação, coincidem com épocas em que as florestas estão suscetíveis, os danos causados apresentam maior severidade. Onde o principal serviço ecossistêmico afetado é o armazenamento de carbono na forma de floresta.

O estudo estruturado por Roy et al. (2012), é uma revisão que engloba uma série de pesquisas e discussões sobre os aspectos positivos e negativos da arborização urbana. Trata da temática de ventos, tendo realizado buscas e citado uma série de autores que abordam o tema. Sua obra é especialmente citada porque traz o panorama dos serviços ecossistêmicos prestados pelas árvores com o objetivo de mostrar os reais benefícios e custos das árvores aos gestores.

Dentro do conjunto de artigos estudados ($n = 1.729$) os artigos mais citados dentro desse mesmo grupo, a idade dos documentos varia entre 38 e 8 anos (Tabela 3). Os artigos foram ordenados pelo número local total de citações (NLC). O artigo mais citado é de Gardiner et al. (2000) que aborda a construção de modelos matemáticos com o objetivo de prever a velocidade crítica do vento para arrancar e quebrar árvores coníferas, contrapondo os resultados com estudos de campo.

Tabela 3 - Os 10 artigos do banco de dados, mais citados no conjunto de artigos do banco de dados

Autoria	NLC	NLC / NTC (%)	NLC normalizada	DOI [link]
Gardiner et al., 2000	23	10.1	26.3	10.1016/S0304-3800(00)00220-9
Canham et al., 1984	17	7.1	5.7	10.2307/1938053
Nagel et al., 2007	14	20.9	18.8	10.1051/forest:2007067
Frelich et al. 1991	13	4.0	8.0	10.2307/1943005
Mitchell et al., 2013	13	5.5	28.0	10.1093/forestry/cps058
Nagel et al., 2014	12	13.6	22.0	10.1890/13-0632.1
Zielonka et al., 2010	12	14.1	24.8	10.1111/j.1654-1103.2009.01121.x
Diaci et al., 2011	11	16.7	20.7	10.1093/forestry/cpr030
Peterson et al., 1995	11	6.0	4.6	10.2307/1939342
Svoboda et al., 2012	11	9.8	33.0	10.1111/j.1654-1103.2011.01329.x

NLC: número local total de citações; *NLC/NTC (%)*: razão entre número local total de citações e número total de citações por ano; *NLC normalizada*: número local total de citações em distribuição normal.

Muitas dúvidas também surgem a partir do referencial teórico dos artigos que compõem o banco de dados ($n = 1.729$). O referencial teórico de cada artigo foi levantado e os vinte artigos mais citados dentro da seção de referências, dos artigos de estudo, estão listados na Tabela 4, com o número de citações e o número de citações das bases de dados do *Google Acadêmico*.

Tabela 4 - Os vinte artigos mais citados nas referências dos artigos do banco de dados, o número de citações e as citações na plataforma do *Google Acadêmico*

Referência citada	Título	N. citações	Citações Scholar
Ulanova (2000)	The effects of windthrow on forests at different spatial scales: a review	70	590
Everham & Brokaw (1996)	Forest damage and recovery from catastrophic wind	65	790
Foster & Boose (1992)	Patterns of forest damage resulting from catastrophic wind in central New England, USA	63	481
Canham, Papaik & Latty (2001)	Interspecific variation in susceptibility to windthrow as a function of tree size and storm severity for northern temperate tree species	62	324
Canham & Loucks (1984)	Catastrophic windthrow in the presettlement forests of Wisconsin	61	486
Schelhaas, Nabuurs & Schuck (2003)	Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries	59	1 019
Beatty (1984)	Influence of microtopography and canopy species on spatial patterns of forest understory plants	48	724
Peterson & Pickett (1995)	Forest reorganization: a case study in an old-growth forest catastrophic <i>blowdown</i>	44	289
Mitchell (2013)	Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis	44	363
Foster (1988)	Species and Stand Response to Catastrophic Wind in Central New England, U.S.A.	44	552
Lohmander (1987)	Windthrow probability as a function of stand characteristics and shelter	42	268
Gardiner et al. (1997)	Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability	42	321
Peltola et al. (1999)	A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch	41	477
Peterson et al. (1990)	Microsite variation and soil dynamics within newly created treefall pits and mounds	40	239
Schaetzl et al. (1989)	Tree uprooting: review of impacts on forest ecology	35	309
Nagel, Svoboda & Diaci (2006)	Regeneration patterns after intermediate wind disturbance in an old-growth Fagus–Abies forest in southeastern Slovenia.	34	221
Bouget & Duelli (2004)	The effects of windthrow on forest insect communities: a literature review	34	352
Nagel & Diaci (2006)	Intermediate wind disturbance in an old-growth beech-fir forest in southeastern Slovenia	33	171
Paine, Tegner & Johnson (1998)	Compounded perturbations yield ecological surprises	27	1074
Turner (2010)	Disturbance and landscape dynamics in a changing world	27	1259

Dos artigos mais citados na Tabela 4, oito artigos são revisões ou *overviews* (Ulanova, 2000; Mitchell, 2013; Paine; Tegner; Johnson, 1998; Turner, 2010; Schaetzi et al., 1989; Bouget; Duelli 2004; Schelhaas; Nabuurs; Schuck, 2003; Schaetzi et al., 1989). Dez artigos retrataram estudos conduzidos em áreas onde ocorreram distúrbios de vento (Nagel; Diaci, 2006; Nagel; Svoboda; Diaci, 2006; Peterson et al., 1990; Gardiner et al., 1997; Lohmander, 1987; Foster, 1988; Peterson; Pickett, 1995; Beatty, 1984 Canham; Loucks, 1984; Canham; Papaik; Latty, 2001; Foster; Boose 1992; Everham; Brokaw, 1996) e o trabalho de Peltola et al. (1999) corresponde a modelagem de algum parâmetro relacionado principalmente aos danos causados pelos ventos.

Os artigos citados trazem principalmente temas voltados para a plantas, como padrão e mecanismos de regeneração da vegetação (Nagel; Svoboda; Diaci, 2006; Peterson; Pickett, 1995). Dos trabalhos citados apenas Beatty (1984) desenvolveu o tema de solos.

A nuvem de palavras gerada a partir dos termos destacados dentro dos artigos de estudo (Figura 10) refletiram a busca realizada dentro das bases de dados, as palavras chaves usadas na busca *windthrow*, *forest* e *blowdown* apareceram em maior número. No entanto, termos como *salvage logging*, *climate change*, *succession*, *coarse woody debris*, *Norway spruce*, *Picea abies*, *remote sensing* nos mostraram como a temática vem sendo abordada.

Figura 10 - Nuvem de palavras com as vinte palavras-chave estabelecidas pelos autores, mais citadas nos documentos (n = 1.729)



Uma das formas de fazer com que trabalhos sejam apreciados pelos leitores de interesse, é trabalhar com os termos que possuem legado e possam facilitar aos pesquisadores encontrar a temática nas bases de dados. Portanto, selecionar as palavras-chave pode ser um fator decisivo na visibilidade de um artigo. Assim, a Figura 11 traz a possibilidade de visualização no tempo dos termos mais usados do nosso banco de dados (n = 1.729). Tratando-se diretamente de termos que podem ser sinônimos a distúrbio de ventos a palavra-chave mais usada é *windthrow*, seguida de *wind disturbance* e *wind damage*. Observa-se ainda que o termo *windthrow* tem sido usado até o ano de 2018.

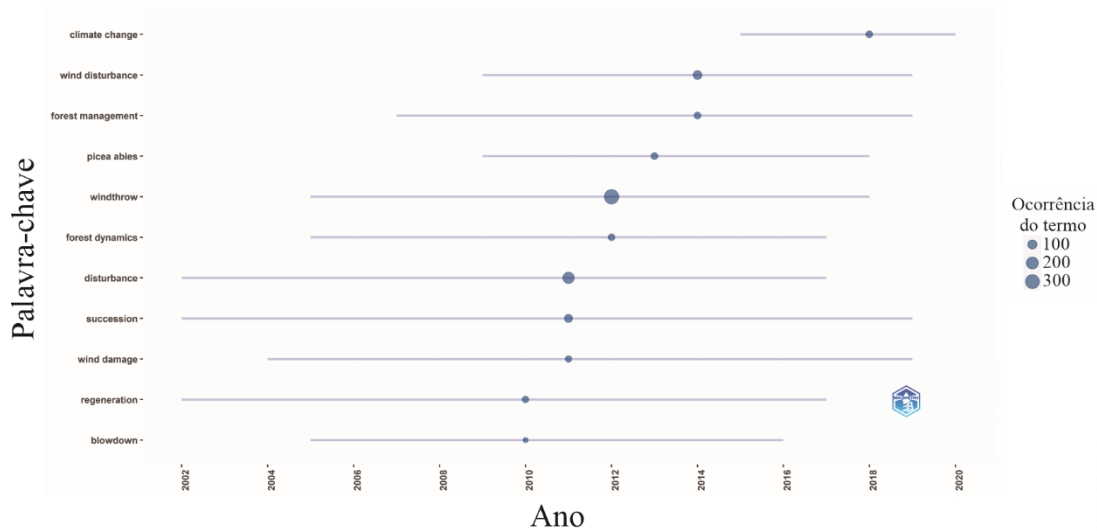


Figura 11 – Principais ocorrências das palavras-chave e sua cronologia

Nesta tese o termo *blowdown* para caracterizar as áreas de estudo, no entanto se observou que este termo foi usado entre os anos de 2005 e 2016 (Figura 11), não aparecendo mais nos últimos anos em artigos revisados aos pares nas bases de dados consultadas em nosso estudo.

Assim como na nuvem de palavras (Figura 10) o termo *climate change* vem sendo utilizado nos últimos anos (Figura 11). A ocorrência deste tipo de fenômeno natural vem sendo apoiada principalmente pelo tema mudanças climáticas; utilizado como justificativa para maior frequência de ocorrência dos desastres naturais.

2.3.5. Solos e Wind disturbances

Nos papers selecionados nesta seção o foco foi estudar os solos. Evidencia-se que dentro do conjunto inicial de artigos foram selecionados apenas os artigos que continham a palavra “soil” em seu título. Os trabalhos destinados a solos dentro do conjunto de artigos analisados (n = 1.792) compreendeu 105 artigos, correspondendo a 5,8% do número total de artigos levantados neste estudo (Tabela 5)

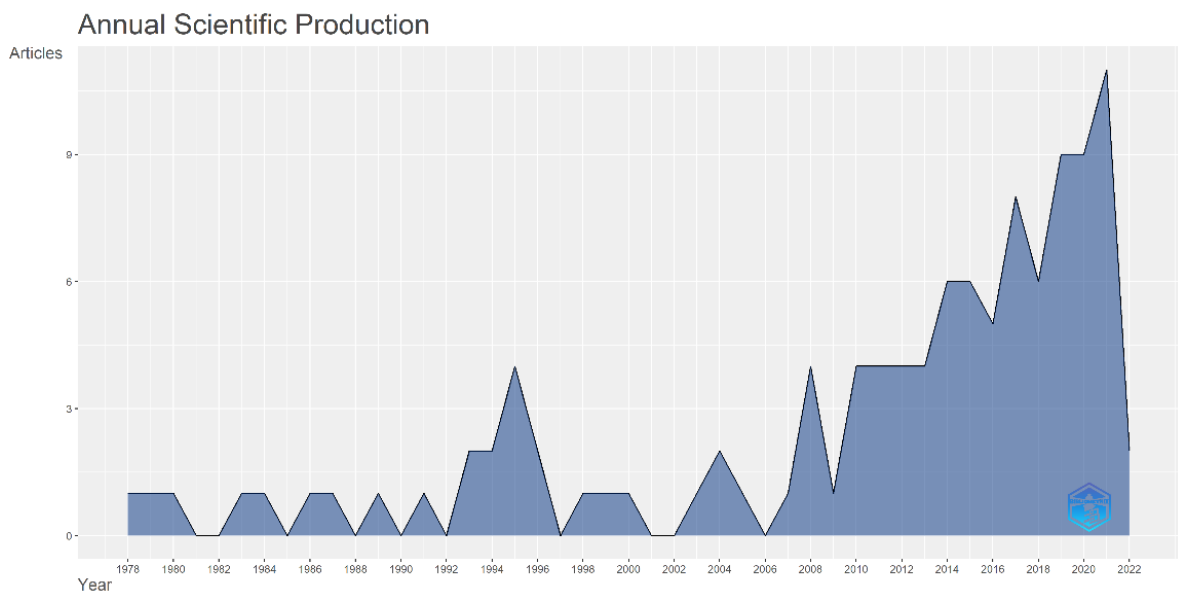
Tabela 5 - Informações principais encontradas sobre artigos com tema central solos no conjunto de artigos sobre wind disturbances

Descrição	Resultado
Período correspondente a pesquisa	1978 á 2022
Periódicos	64
Número de documentos avaliados	105
Publicação média anual	11,6
Média de citações por artigo	16,32
Total de citações dos artigos	1.416
N. total de referências citadas	4.182
Tipos de artigos avaliados	
Artigos	103
Artigos de revisão	2
Itens dos artigos	
Palavras-chave (<i>Keywords Plus</i>)	843
Palavras-chave do autor (<i>Author's Keywords</i>)	376
Autores	
Autores	362
Aparições de autor	438
Autores de artigos com um único autor	10
Autores de artigos com vários autores	352
Colaboração entre autores	
Artigos com um único autor	10
Artigo por autor	0,304
Autores por artigo	3,29
Coautores por artigo	3,98
Índice de Colaboração	3,52

Nos últimos 5 anos foram produzidos 29 artigos (2017-2021) (

Figura 12) observou-se que a nos últimos anos a quantidade de artigos tem aumentado, apesar de que, o foco principal do desenvolvimento da ciência que estuda as florestas afetadas por distúrbios de ventos é essencialmente a biomassa acima do solo. Assim justificam-se os esforços no desenvolvimento desta tese.

Figura 12 - Produção científica anual de artigos com tema central solos no conjunto de artigos sobre wind disturbances



2.3.5.1. Informações sobre os artigos

Dentre os artigos que compõe o estudo nesta seção sobre solos e wind disturbances, foram selecionados os dez mais citados conforme as bases (Tabela 6).

Tabela 6 - Os dez artigos mais citados conforme as bases de dados *WOS* e *Scopus*

Autoria	NTC	NTC/ANO	NTC normalizada	DOI [link]
Longdoz et al. 2000	175	7.6	1.0	10.1046/j.1365-2486.2000.00369.x
Bormann et al. 1995	136	4.9	3.2	10.2307/2261411
Štursová et al. 2014	98	10.9	3.5	10.1038/ismej.2014.37
Tang et al. 2009	88	6.3	1.0	10.1111/j.1365-2486.2008.01741.x
Dupuy et al. 2007	86	5.4	1.0	10.3732/ajb.94.9.1506
Bowden et al. 1993	49	1.6	1.4	10.1007/BF00000871
Kramer et al. 2004	44	2.3	1.5	10.1890/02-4098
Moroni et al. 2003	37	1.9	1.0	10.1016/S0378-1127(02)00410-3
Geng et al. 2012	34	3.1	1.3	10.1016/j.apsoil.2012.07.001
Ryan et al. 1983	31	0.8	1.7	10.2136/sssaj1983.03615995004700020023x

A leitura dos 105 artigos foi realizada a fim de determinar *i)* principais objetivos dos trabalhos e *ii)* as principais variáveis avaliadas. De modo geral o objetivo dos pesquisadores foi observar os efeitos da queda de florestas em diferentes grupos de atributos do solo. A principal medida adotada pelos autores foi comparar diferenças entre áreas contratantes, onde houve queda de vegetação em decorrência de tempestades e onde não houve, outros trabalharam com graus de severidade da queda de florestas. A principal pergunta das pesquisas foi “*houve consequências com a queda da floresta?*” e essa pergunta foi investigada com base em papers que trabalharam exclusivamente com solos e com solos em associação com plantas componentes da biomassa acima do solo.

Para responder a estes objetivos as principais variáveis estudadas (n=103) foram carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), pH, emissão de gases do efeito estufa (GEE's), indicadores microbiológicos do solo (respiração basal, respiração potencial, atividade enzimática, mineralização de N, biomassa microbiana, riqueza microbiana, diversidade microbiana) e conteúdo de água no solo (CAS) aparecendo em 29, 23, 23, 20 e 16 % dos artigos (n = 105).

Os conteúdos de C no solo, COT e estoque de C, refletiram a dinâmica da MOS nos solos; ao estudar florestas temperadas Mayer et al. (2022), uma década depois da queda da floresta, não encontraram diferenças entre os estoques de solo

C no solo, quando comparadas com áreas intactas e onde ocorreu o fenômeno. Conforme Sterzyńska; Skłodowski (2018) existiu uma correlação positiva das comunidades de colembólos com o COT, em áreas de pinheiros, o que indica o acúmulo de MOS.

Santos et al. (2016) relataram que ocorreu um grande aporte de serapilheira, associadas a queda da floresta, mas consideraram o aumento encontrado no COT como de curto prazo, relacionado com a rápida ciclagem de nutrientes e reestabelecimento da floresta em áreas tropicais, concluindo que quanto maior o conteúdo de COT maior é a resiliência da floresta. Corroborando com Sterzyńska e Skłodowski (2018), em área temperada, também associaram maiores taxas de COT ao aumento do fechamento do dossel dos povoamentos de pinheiros.

Após os distúrbios causados por ventos, observou-se o aumento dos estoques de COT e TN (Savaci et al., 2021). A abertura do dossel está associada ao aumento do pH e da umidade do solo (Sterzyńska; Skłodowski, 2018).

Bowden et al. (1993) ao estudarem durante um ano, uma floresta temperada de madeira de 77 anos, após um furacão simulado. Ao comparar as suas duas condições (controle versus floresta perturbada) não encontraram diferenças significativas entre os fluxos médios de óxido nitroso (N_2O), dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) emitidos pelos solos.

Köster, Püttsepp e Pumpanen (2011) após estabelecerem um estudo para determinar fluxos instantâneos de GEE's dos solos, em áreas de florestas de abetos, onde foi realizada remoção de madeira, concluíram que quando removida a matéria orgânica morta, houve uma redução do fluxo instantâneo de CO_2 do solo. Em suas parcelas de trabalho os maiores fluxos de CO_2 foram obtidos em áreas total ou parcialmente danificadas pelo vento, sem remoção de material. Além disso, foram medidos os fluxos de CO_2 no solo onde árvores foram arrancadas, sendo que em solo comprometido pelo arranquio, apresentou fluxos mais baixos do que na floresta com solo intacto.

Kobler et al. (2015) estudaram sobre o efeito dos distúrbios de ventos combinado com ataque de insetos. Observaram que a diminuição do crescimento do povoamento reduziu o efluxo de CO_2 do solo, principalmente devido a uma menor contribuição da respiração autotrófica do solo. Os autores constaram ainda que a área perturbada do povoamento ainda funcionava como um pequeno sumidouro em C.

Quanto aos indicadores microbiológicos do solo, áreas com queda de árvores possuem maior atividade biológica (Sterzyńska; Skłodowski, 2018) e áreas com maior severidade, maior respiração microbiana do solo e maior mineralização de N (Kooch et al., 2014).

O CAS do solo foi obtido nos estudos, para ser levada em consideração pois é um fator limitante a vida no solo, sua escassez paralisa a atividade da microbiota. Ao passo que seu excesso não permite a completa oxidação da MOS no solo. Assim, o processo de mineralização é comprometido, e os autores podem inferir sobre o comportamento de seu funcionamento. Sterzyńska e Skłodowski (2018) encontraram como principal fator que regula a população de colembôlos em áreas com diferentes graus de severidade de queda da floresta na Polônia, é a umidade, apresentando um comportamento de correlação negativa com as comunidades de Collembola.

De modo geral os trabalhos foram direcionados principalmente para a biologia do solo, contemplando principiante o ciclo biogeoquímico do C, uma vez que o principal resultado da queda da floresta é a deposição de material rico em C na superfície do solo. Autores citam que os *windthrow* criam diferentes microsites, alterando as características do solo em microescala. Concluindo ainda, que houve a promoção da pedodiversidade e, em última análise, a biodiversidade florestal em virtude do fenômeno (Kooch et al., 2014).

As mudanças climáticas já não podem ser contraditas, estudar florestas compreendendo a dinâmica de funcionamento dos ciclos biogeoquímicos, nos traz a possibilidade de concluir, por exemplo, sobre a resiliência desses ecossistemas e posteriormente o impacto que isso gera para a sociedade. Florestas são as grandes responsáveis pelo armazenamento de carbono na forma de biomassa e nos solos como MOS.

A destruição causada por um distúrbio de vento pode transformar uma floresta ativa que faz trocas líquidas no ecossistema em matéria orgânica morta, e em um primeiro momento isso afeta principalmente a capacidade de assimilação de C. Assim, comprometendo a função de sumidouro de C temporariamente. Essas questões dependem de uma série de variáveis determinadas pelas condições de clima e ao tipo de bioma, ao qual a floresta pertence, sendo de grande importância o conhecimento sobre a magnitude ou extensão com que as tempestades influenciam o efluxo de carbono (Köster; Püttsepp; Pumpanen, 2011).

Além disso, o processo de evapotranspiração possui a capacidade de regular o clima de regiões inteiras, dadas as suas relações com o ciclo hidrológico. Essas abordagens estão ligadas diretamente aos fenômenos ocasionados pelas mudanças climáticas como grandes períodos e estiagem ou seca, enchentes, eventos extremos como no objeto de trabalho, os distúrbios de vento *downsbursts*, ciclones e tornados. Além disso, esses trabalhos trazem para a sociedade a preocupação e dedicação dos cientistas com o meio ambiente, remontando a importância das florestas no contexto mundial.

2.3.5.2. *Blowdowns* e solos

A Etapa III deste estudo buscou-se encontrar em meio aos artigos que trabalham com solos, estudados na Etapa II (n= 105), os que foram desenvolvidos em áreas onde ocorreu o fenômeno *blowdown*. Cada fenômeno de vento possui suas particularidades, principalmente devido a forma com que se manifesta. Os *blowdowns* também chamados de “arremesso de vento” ou de “explosão de ventos”, suas principais características são a derrubada da floresta e quando em grandes proporções até mesmo o arranquio de árvores, isso se deve ao movimento do vento que se choca com o solo espalhando-se, a partir do ponto de impacto, em todas as direções (overflow).

Uma das maiores dificuldades nos artigos de estudo foi encontrar o tipo de fenômeno que causou a queda da floresta, principalmente porque os autores chamam de “windthrow” com a informação adicional da data em que o evento aconteceu. Assim, além da verificação nos artigos, uma busca geral no *Google* foi realizada para a determinação do tipo de distúrbio de vento que gerou a queda na área de estudo. Foram considerados para este filtro as descrições dos eventos de tempestades convectivas, *downbursts* e *blowdown*.

Dentre os artigos que trabalharam com a temática solos, foram agrupados onze artigos que estudaram áreas onde aconteceu exclusivamente o fenômeno identificado como *blowdown* (Tabela 7).

Tabela 7 - Autores que trabalharam com solos em áreas de *blowdown*

Autoria	DOI
Mayer et al. (2014)	10.5194/bg-11-6081-2014
Millikin; Bowden (1996)	10.2136/sssaj1996.03615995006000060047x
Bowden et al. (1993)	10.1007/BF00000871
Šimonovičová et al. (2019)	10.3390/su11236851
Barančíková et al. (2018)	10.1007/s11368-018-1942-2
Gömöryová et al. (2017)	10.3832/ifor2304-010
Gömöryová; Fleischer; Gömöry (2014)	10.2478/forj-2014-0014
Santos et al. (2016)	10.5194/bg-13-1299-2016
Barreto et al. (2021)	10.1590/0102-33062020abb0280
Mitchell; Kolka; Fraver (2012)	10.1021/es300133h
Kramer; Sollins; Sletten (2004)	10.1890/02-4098

2.4. Conclusão

Conclui-se que *i)* apesar do grande número de trabalhos em áreas perturbadas por distúrbios de vento poucos são os autores que desenvolveram estudos relacionados aos solos dessas áreas; *ii)* os autores em sua maioria retrataram a dinâmica da biomassa acima do solo; e *iii)* os autores atribuem a ocorrência dos distúrbios naturais de vento as mudanças climáticas.

Referências

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, vol. 11, no. 4, p. 959–975, Nov. 2017. DOI 10.1016/j.joi.2017.08.007. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751157717300500>.

BARANČÍKOVÁ, G.; JARZYKIEWICZ, M.; GÖMÖRYOVÁ, E.; TOBIAŠOVÁ, E.; LITAVEC, T. Changes in forest soil organic matter quality affected by windstorm and wildfire. **Journal of Soils and Sediments**, vol. 18, no. 8, p. 2738–2747, 22 Aug. 2018. DOI 10.1007/s11368-018-1942-2. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s11368-018-1942-2>.

BARRETO, T. E.; IVANAUSKAS, N. M.; LIMA, R. A. F. de; TONIATO, M. T. Z.; SOUZA, F. M.; RODRIGUES, R. R. Canopy openness and soil conditions explain community structure and diversity in a tropical seasonal forest in south-eastern Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, vol. 35, no. 4, p. 638–652, Dec. 2021. DOI 10.1590/0102-33062020abb0280. Available at: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-33062021000900638&tlng=en.

BEATTY, S. W. Influence of Microtopography and Canopy Species on Spatial Patterns of Forest Understory Plants. **Ecology**, vol. 65, no. 5, p. 1406–1419, Oct. 1984. DOI 10.2307/1939121. Available at: <http://doi.wiley.com/10.2307/1939121>.

BORMANN, B. T.; SPALTENSTEIN, H.; MCCLELLAN, M. H.; UGOLINI, F. C.; JR., K. C.; NAY, S. M. Rapid Soil Development After Windthrow Disturbance in Pristine Forests. **The Journal of Ecology**, vol. 83, no. 5, p. 747, Oct. 1995. DOI 10.2307/2261411. Available at: <https://www.jstor.org/stable/2261411?origin=crossref>.

BOUGET, C.; DUELLI, P. The effects of windthrow on forest insect communities: a literature review. **Biological Conservation**, vol. 118, no. 3, p. 281–299, Jul. 2004. DOI 10.1016/j.biocon.2003.09.009. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0006320703003677>.

BOWDEN, R. D.; CASTRO, M. S.; MELILLO, J. M.; STEUDLER, P. A.; ABER, J. D. Fluxes of greenhouse gases between soils and the atmosphere in a temperate forest following a simulated hurricane blowdown. **Biogeochemistry**, vol. 21, no. 2, p. 61–71, Jun. 1993. DOI 10.1007/BF00000871. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/BF00000871>.

CANHAM, C. D.; LOUCKS, O. L. Catastrophic Windthrow in the Presettlement Forests of Wisconsin. **Ecology**, vol. 65, no. 3, p. 803–809, Jun. 1984. DOI 10.2307/1938053. Available at: <http://doi.wiley.com/10.2307/1938053>.

CANHAM, C. D.; PAPAİK, M. J.; LATTY, E. F. Interspecific variation in susceptibility to windthrow as a function of tree size and storm severity for northern temperate tree species. **Canadian Journal of Forest Research**, vol. 31, no. 1, p. 1–10, 1 Jan. 2001. DOI 10.1139/x00-124. Available at: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/x00-124>.

DIACI, J.; ROZENBERGAR, D.; ANIC, I.; MIKAC, S.; SANIGA, M.; KUCBEL, S.; VISNJIC, C.; BALLIAN, D. Structural dynamics and synchronous silver fir decline in mixed old-growth mountain forests in Eastern and Southeastern Europe. **Forestry**, vol. 84, no. 5, p. 479–491, 1 Dec. 2011. DOI 10.1093/forestry/cpr030. Available at: <https://academic.oup.com/forestry/article-lookup/doi/10.1093/forestry/cpr030>.

DOS SANTOS, L. T.; MAGNABOSCO MARRA, D.; TRUMBORE, S.; DE CAMARGO, P. B.; NEGRÓN-JUÁREZ, R. I.; LIMA, A. J. N.; RIBEIRO, G. H. P. M.; DOS SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Windthrows increase soil carbon stocks in a central Amazon forest. **Biogeosciences**, vol. 13, no. 4, p. 1299–1308, 2 Mar. 2016. DOI 10.5194/bg-13-1299-2016. Available at: <https://bg.copernicus.org/articles/13/1299/2016/>.

DUPUY, L. X.; FOURCAUD, T.; LAC, P.; STOKES, A. A generic 3D finite element model of tree anchorage integrating soil mechanics and real root system architecture. **American Journal of Botany**, vol. 94, no. 9, p. 1506–1514, 1 Sep. 2007. DOI 10.3732/ajb.94.9.1506. Available at: <http://doi.wiley.com/10.3732/ajb.94.9.1506>.

ELANGO, B.; RAJENDRAN, P.; CITATION: ELANGO, B.; RAJENDRAN, P.; ELANGO, B.; RAJENDRAN, P. Authorship trends and collaboration pattern in the marine sciences literature: a scientometric study. **International Journal of Information Dissemination and Technology**, vol. 2, no. 3, p. 166, 2012. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Elango-B/publication/232763775_Authorship_Trends_and_Collaboration_Pattern_in_the_Marine_Sciences_Literature_A_Scientometric_Study/links/09e4150948f348edcc000000/Authorship-Trends-and-Collaboration-Pattern-in-the-Marin. Accessed on: 8 May 2022.

EVERHAM, E. M.; BROKAW, N. V. L. Forest damage and recovery from catastrophic wind. **The Botanical Review**, vol. 62, no. 2, p. 113–185, Apr. 1996. DOI 10.1007/BF02857920. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/BF02857920>.

FOSTER, D. R. Species and Stand Response to Catastrophic Wind in Central New England, U.S.A. **The Journal of Ecology**, vol. 76, no. 1, p. 135, Mar. 1988. DOI 10.2307/2260458. Available at: <https://www.jstor.org/stable/2260458?origin=crossref>.

FOSTER, D. R.; BOOSE, E. R. Patterns of Forest Damage Resulting from Catastrophic Wind in Central New England, USA. **The Journal of Ecology**, vol. 80, no. 1, p. 79, Mar. 1992. DOI 10.2307/2261065. Available at: <https://www.jstor.org/stable/2261065?origin=crossref>.

FOSTER, D. S. THUNDERSTORM GUSTS COMPARED WITH COMPUTED DOWNDRAFT SPEEDS. **Monthly Weather Review**, vol. 86, no. 3, p. 91–94, Mar. 1958. DOI 10.1175/1520-0493(1958)086<0091:TGCWCD>2.0.CO;2. Available at: [http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0493\(1958\)086%3C0091:TGCWCD%3E2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0493(1958)086%3C0091:TGCWCD%3E2.0.CO;2).

FRANKLIN, J. F.; FORMAN, R. T. T. Creating landscape patterns by forest cutting: Ecological consequences and principles. **Landscape Ecology**, vol. 1, no. 1, p. 5–18, Jul. 1987. DOI 10.1007/BF02275261. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/BF02275261>.

FRELICH, L. E.; LORIMER, C. G. Natural Disturbance Regimes in Hemlock-Hardwood Forests of the Upper Great Lakes Region. **Ecological Monographs**, vol. 61, no. 2, p. 145–164, Jun. 1991. DOI 10.2307/1943005. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2307/1943005>.

FUJITA, T. T. **Manual of downburst identification for project NIMROD**. [S. l.: s. n.], 1978. Available at: <https://www.nrc.gov/docs/ML0526/ML052650410.pdf>.

GARDINER, B. A.; STACEY, G. R.; BELCHER, R. E.; WOOD, C. J. Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability. **Forestry**, vol. 70, no. 3, p. 233–252, 1 Jan. 1997. DOI 10.1093/forestry/70.3.233. Available at: <https://academic.oup.com/forestry/article-lookup/doi/10.1093/forestry/70.3.233>.

GARDINER, B.; PELTOLA, H.; KELLOMÄKI, S. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. **Ecological Modelling**, vol. 129, no. 1, p. 1–23, May 2000. DOI 10.1016/S0304-3800(00)00220-9. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304380000002209>.

GARSTANG, M.; WHITE, S.; SHUGART, H. H.; HALVERSON, J. Convective cloud downdrafts as the cause of large blowdowns in the Amazon rainforest. **Meteorology and Atmospheric Physics**, vol. 67, no. 1–4, p. 199–212, Mar. 1998. DOI 10.1007/BF01277510. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/BF01277510>.

GENG, Y.; DIGHTON, J.; GRAY, D. The effects of thinning and soil disturbance on enzyme activities under pitch pine soil in New Jersey Pinelands. **Applied Soil Ecology**, vol. 62, p. 1–7, Nov. 2012. DOI 10.1016/j.apsoil.2012.07.001. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0929139312001539>.

GÖMÖRYOVÁ, E.; FLEISCHER, P.; PICHLER, V.; HOMOLÁK, M.; GERE, R.; GÖMÖRY, D. Soil microorganisms at the windthrow plots: the effect of post-disturbance management and the time since disturbance. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, vol. 10, no. 2, p. 515–521, 30 Apr. 2017. DOI 10.3832/ifor2304-010. Available at: <https://iforest.sisef.org/?doi=ifor2304-010>.

GÖMÖRYOVÁ, Erika; FLEISCHER, P.; GÖMÖRY, D. Soil microbial community responses to windthrow disturbance in Tatra National Park (Slovakia) during the period 2006 – 2013 / Odozva pôdneho mikrobiálneho spoločenstva na veternú kalamitu v Tatranskom národnom parku (Slovensko) v období rokov 2006–2013. **Forestry Journal**, vol. 60, no. 3, 1 Jan. 2014. DOI 10.2478/forj-2014-0014. Available at: <https://content.sciendo.com/doi/10.2478/forj-2014-0014>.

GREENE, D. F.; ZASADA, J. C.; SIROIS, L.; KNEESHAW, D.; MORIN, H.; CHARRON, I.; SIMARD, M.-J. A review of the regeneration dynamics of North American boreal forest tree species. **Canadian Journal of Forest Research**, vol. 29, no. 6, p. 824–839, 1999. DOI 10.1139/cjfr-29-6-824. Available at: http://www.nrc.ca/cgi-bin/cisti/journals/rp/rp2_abst_e?cjfr_x98-112_29_ns_nf_cjfr29-99.

HEINSELMAN, M. L. Fire in the Virgin Forests of the Boundary Waters Canoe Area, Minnesota. **Quaternary Research**, vol. 3, no. 3, p. 329–382, 20 Oct. 1973. DOI 10.1016/0033-5894(73)90003-3. Available at: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0033589400035985/type/journal_article.

KOBLER, J.; JANDL, R.; DIRNBÖCK, T.; MIRTL, M.; SCHINDLBACHER, A. Effects of stand patchiness due to windthrow and bark beetle abatement measures on soil CO₂ efflux and net ecosystem productivity of a managed temperate mountain forest. **European Journal of Forest Research**, vol. 134, no. 4, p. 683–692, 11 Jul. 2015. DOI 10.1007/s10342-015-0882-2. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10342-015-0882-2>.

KOOCH, Y.; HOSSEINI, S. M.; SAMONIL, P.; HOJJATI, S. M. The effect of windthrow disturbances on biochemical and chemical soil properties in the northern mountainous forests of Iran. **CATENA**, vol. 116, p. 142–148, May 2014. DOI 10.1016/j.catena.2014.01.002. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0341816214000174>.

KOSEOGLU, M. A. Growth and structure of authorship and co-authorship network in the strategic management realm: Evidence from the Strategic Management Journal. **BRQ Business Research Quarterly**, vol. 19, no. 3, p. 153–170, Jul. 2016. DOI 10.1016/j.brq.2016.02.001. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2340943616300019>.

KÖSTER, K.; PÜTTSEPP, Ü.; PUMPANEN, J. Comparison of soil CO₂ flux between uncleared and cleared windthrow areas in Estonia and Latvia. **Forest Ecology and Management**, vol. 262, no. 2, p. 65–70, Jul. 2011. DOI 10.1016/j.foreco.2010.09.023. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112710005554>.

KRAMER, M. G.; SOLLINS, P.; SLETTEN, R. S. SOIL CARBON DYNAMICS ACROSS A WINDTHROW DISTURBANCE SEQUENCE IN SOUTHEAST ALASKA. **Ecology**, vol. 85, no. 8, p. 2230–2244, Aug. 2004. DOI 10.1890/02-4098. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1890/02-4098>.

LAURANCE, W. F.; FERREIRA, L. V.; MERONA, J. M. R.; LAURANCE, S. G. RAIN FOREST FRAGMENTATION AND THE DYNAMICS OF AMAZONIAN TREE COMMUNITIES. **Ecology**, vol. 79, no. 6, p. 2032–2040, 1998. DOI [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1998\)079\[2032:RFFATD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1998)079[2032:RFFATD]2.0.CO;2). Available at: [https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/0012-9658\(1998\)079\[2032:RFFATD\]2.0.CO;2](https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/0012-9658(1998)079[2032:RFFATD]2.0.CO;2). Accessed on: 17 Aug. 2022.

LOHMANDER, P.; HELLES, F. Windthrow probability as a function of stand characteristics and shelter. **Scandinavian Journal of Forest Research**, vol. 2, no. 1–4, p. 227–238, 10 Jan. 1987. DOI 10.1080/02827588709382460. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02827588709382460>.

LONGDOZ, B.; YERNAUX, M.; AUBINET, M. Soil CO₂ efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution. **Global Change Biology**, vol. 6, no. 8, p. 907–917, Dec. 2000. DOI 10.1046/j.1365-2486.2000.00369.x. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1046/j.1365-2486.2000.00369.x>.

LOREDO-SOUZA, A. M.; LIMA, E. G.; VALLIS, M. B.; ROCHA, M. M.; WITTEWER, A. R.; OLIVEIRA, M. G. K. Downburst related damages in Brazilian buildings: Are they avoidable? **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 185, p. 33–40, Feb. 2019. DOI 10.1016/j.jweia.2018.11.022. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167610518305142>.

MAYER, M.; MATTHEWS, B.; SCHINDLBACHER, A.; KATZENSTEINER, K. Soil CO₂ efflux from mountainous windthrow areas: dynamics over 12 years post-disturbance. **Biogeosciences**, vol. 11, no. 21, p. 6081–6093, 11 Nov. 2014. DOI 10.5194/bg-11-6081-2014. Available at: <https://bg.copernicus.org/articles/11/6081/2014/>.

MAYER, Mathias; ROSINGER, C.; GORFER, M.; BERGER, H.; DELTEDESCO, E.; BÄSSLER, C.; MÜLLER, J.; SEIFERT, L.; REWALD, B.; GODBOLD, D. L. Surviving trees and deadwood moderate changes in soil fungal communities and associated functioning after natural forest disturbance and salvage logging. **Soil Biology and Biochemistry**, vol. 166, p. 108558, Mar. 2022. DOI 10.1016/j.soilbio.2022.108558. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038071722000153>.

MILLIKIN, C. S.; BOWDEN, R. D. Soil Respiration in Pits and Mounds Following an Experimental Forest Blowdown. **Soil Science Society of America Journal**, vol. 60, no. 6, p. 1951–1953, Nov. 1996. DOI 10.2136/sssaj1996.03615995006000060047x. Available at: <http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj1996.03615995006000060047x>.

MITCHELL, C. P. J.; KOLKA, R. K.; FRAVER, S. Singular and Combined Effects of Blowdown, Salvage Logging, and Wildfire on Forest Floor and Soil Mercury Pools. **Environmental Science & Technology**, vol. 46, no. 15, p. 7963–7970, 7 Aug. 2012. DOI 10.1021/es300133h. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es300133h>.

MITCHELL, S. J. Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis. **Forestry**, vol. 86, no. 2, p. 147–157, 1 Apr. 2013. DOI 10.1093/forestry/cps058. Available at: <https://academic.oup.com/forestry/article-lookup/doi/10.1093/forestry/cps058>.

MORONI, M. T.; WORLEDGE, D.; BEADLE, C. L. Root distribution of *Eucalyptus nitens* and *E. globulus* in irrigated and droughted soil. **Forest Ecology and Management**, vol. 177, no. 1–3, p. 399–407, Apr. 2003. DOI 10.1016/S0378-1127(02)00410-3. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112702004103>.

NAGEL, T. A.; DIACI, J. Intermediate wind disturbance in an old-growth beech-fir forest in southeastern Slovenia. **Canadian Journal of Forest Research**, vol. 36, no. 3, p. 629–638, 1 Mar. 2006. DOI 10.1139/x05-263. Available at: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/x05-263>.

NAGEL, T. A.; LEVANIC, T.; DIACI, J. A dendroecological reconstruction of disturbance in an old-growth *Fagus-Abies* forest in Slovenia. **Annals of Forest Science**, vol. 64, no. 8, p. 891–897, Jan. 2007. DOI 10.1051/forest:2007067. Available at: <http://link.springer.com/10.1051/forest:2007067>.

NAGEL, T. A.; SVOBODA, M.; DIACI, J. Regeneration patterns after intermediate wind disturbance in an old-growth *Fagus–Abies* forest in southeastern Slovenia. **Forest Ecology and Management**, vol. 226, no. 1–3, p. 268–278, May 2006. DOI 10.1016/j.foreco.2006.01.039. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112706000879>.

NAGEL, T. A.; SVOBODA, M.; KOBAL, M. Disturbance, life history traits, and dynamics in an old-growth forest landscape of southeastern Europe. **Ecological Applications**, vol. 24, no. 4, p. 663–679, Jun. 2014. DOI 10.1890/13-0632.1. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1890/13-0632.1>.

NEGRÓN-JUÁREZ, R. I.; JENKINS, H. S.; RAUPP, C. F. M.; RILEY, W. J.; KUEPPERS, L. M.; MARRA, D. M.; RIBEIRO, G. H. P. M.; MONTEIRO, M. T. F.; CANDIDO, L. A.; CHAMBERS, J. Q.; HIGUCHI, N. Windthrow variability in central Amazonia. **Atmosphere**, vol. 8, no. 2, p. 1–17, 2017. <https://doi.org/10.3390/atmos8020028>.

PAINE, R. T.; TEGNER, M. J.; JOHNSON, E. A. Compounded Perturbations Yield Ecological Surprises. **Ecosystems**, vol. 1, no. 6, p. 535–545, 1 Nov. 1998. DOI 10.1007/s100219900049. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s100219900049>.

PELTOLA, H.; KELLOMÄKI, S.; VÄISÄNEN, H.; IKONEN, V.-P. A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. **Canadian Journal of Forest Research**, vol. 29, no. 6, p. 647–661, 1 Jun. 1999. DOI 10.1139/x99-029. Available at: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/x99-029>.

PETERSON, C. J. Forest reorganization: A case study in an old-growth forest catastrophic blowdown. **Ecology**, vol. 76, no. 3, p. 763–774, 1995. <https://doi.org/10.2307/1939342>.

PETERSON, Chris J.; CARSON, W. P.; MCCARTHY, B. C.; PICKETT, S. T. A. Microsite Variation and Soil Dynamics within Newly Created Treefall Pits and Mounds. **Oikos**, vol. 58, no. 1, p. 39, May 1990. DOI 10.2307/3565358. Available at: <https://www.jstor.org/stable/3565358?origin=crossref>.

PETERSON, Chris J.; PICKETT, S. T. A. Forest Reorganization: A Case Study in an Old-Growth Forest Catastrophic Blowdown. **Ecology**, vol. 76, no. 3, p. 763–774, Apr. 1995. DOI 10.2307/1939342. Available at: <http://doi.wiley.com/10.2307/1939342>.

ROY, S.; BYRNE, J.; PICKERING, C. A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. **Urban Forestry & Urban Greening**, vol. 11, no. 4, p. 351–363, Jan. 2012. DOI 10.1016/j.ufug.2012.06.006. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866712000829>.

RYAN, P. J.; MCGARITY, J. W. The Nature and Spatial Variability of Soil Properties Adjacent to Large Forest Eucalypts. **Soil Science Society of America Journal**, vol. 47, no. 2, p. 286–293, Mar. 1983. DOI 10.2136/sssaj1983.03615995004700020023x. Available at: <http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj1983.03615995004700020023x>.

SANTOS, L. T.; MAGNABOSCO MARRA, D.; TRUMBORE, S.; DE CAMARGO, P. B.; NEGRÓN-JUÁREZ, R. I.; LIMA, A. J. N.; RIBEIRO, G. H. P. M.; DOS SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Windthrows increase soil carbon stocks in a central Amazon forest. **Biogeosciences**, vol. 13, no. 4, p. 1299–1308, 2 Mar. 2016. DOI 10.5194/bg-13-1299-2016. Available at: <https://bg.copernicus.org/articles/13/1299/2016/>.

SAVACI, G.; SARIYILDIZ, T.; ÇAĞLAR, S.; KARA, F.; TOPAL, E. The Effects of Windthrow Damage on Soil Properties in Scots Pine, Black Pine and Kazdağı Fir Stands in the Northwest Turkey. **Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi**, 31 Dec. 2021. DOI 10.17475/kastorman.1049328. Available at: <https://dergipark.org.tr/en/doi/10.17475/kastorman.1049328>.

SCHAETZL, R. J.; BURNS, S. F.; JOHNSON, D. L.; SMALL, T. W. Tree uprooting: review of impacts on forest ecology. **Vegetatio**, vol. 79, no. 3, p. 165–176, 1988. DOI 10.1007/BF00044908. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/BF00044908>.

SCHELHAAS, M.-J.; NABUURS, G.-J.; SCHUCK, A. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. **Global Change Biology**, vol. 9, no. 11, p. 1620–1633, Nov. 2003. DOI 10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x>.

SEIDL, R.; SCHELHAAS, M.-J.; LEXER, M. J. Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe. **Global Change Biology**, vol. 17, no. 9, p. 2842–2852, Sep. 2011. DOI 10.1111/j.1365-2486.2011.02452.x. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2011.02452.x>.

ŠIMONOVİČOVÁ, A.; KRAKOVÁ, L.; PIECKOVÁ, E.; PLANÝ, M.; GLOBANOVÁ, M.; PAUDITŠOVÁ, E.; ŠOLTYS, K.; BUDIŠ, J.; SZEMES, T.; GÁFRIKOVÁ, J.; PANGALLO, D. Soil Microbiota of Dystric Cambisol in the High Tatra Mountains (Slovakia) after Windthrow. **Sustainability**, vol. 11, no. 23, p. 6851, 2 Dec. 2019. DOI 10.3390/su11236851. Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/23/6851>.

STERZYŃSKA, M.; SKŁODOWSKI, J. Divergence of soil microarthropod (Hexapoda: Collembola) recovery patterns during natural regeneration and regeneration by planting of windthrown pine forests. **Forest Ecology and Management**, vol. 429, p. 414–424, Dec. 2018. DOI 10.1016/j.foreco.2018.07.033. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112718303633>.

ŠTURSOVÁ, M.; ŠNAJDR, J.; CAJTHAML, T.; BÁRTA, J.; ŠANTRŮČKOVÁ, H.; BALDRIAN, P. When the forest dies: the response of forest soil fungi to a bark beetle-induced tree dieback. **The ISME Journal**, vol. 8, no. 9, p. 1920–1931, 27 Sep. 2014. DOI 10.1038/ismej.2014.37. Available at: <http://www.nature.com/articles/ismej201437>.

SVOBODA, M.; JANDA, P.; NAGEL, T. A.; FRAVER, S.; REJZEK, J.; BAČE, R. Disturbance history of an old-growth sub-alpine *Picea abies* stand in the Bohemian Forest, Czech Republic. **Journal of Vegetation Science**, vol. 23, no. 1, p. 86–97, Feb. 2012. DOI 10.1111/j.1654-1103.2011.01329.x. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1654-1103.2011.01329.x>.

TANG, J.; BOLSTAD, P. V.; MARTIN, J. G. Soil carbon fluxes and stocks in a Great Lakes forest chronosequence. **Global Change Biology**, vol. 15, no. 1, p. 145–155, Jan. 2009. DOI 10.1111/j.1365-2486.2008.01741.x. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2008.01741.x>.

TURNER, M. G. Disturbance and landscape dynamics in a changing world. **Ecology**, vol. 91, no. 10, p. 2833–2849, Oct. 2010. DOI 10.1890/10-0097.1. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/10-0097.1>.

TURNER, M. G.; BAKER, W. L.; PETERSON, C. J.; PEET, R. K. Factors Influencing Succession: Lessons from Large, Infrequent Natural Disturbances. **Ecosystems**, vol. 1, no. 6, p. 511–523, 1 Nov. 1998. DOI 10.1007/s100219900047. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s100219900047>.

ULANOVA, N. G. The effects of windthrow on forests at different spatial scales: a review. **Forest Ecology and Management**, vol. 135, no. 1–3, p. 155–167, Sep. 2000. DOI 10.1016/S0378-1127(00)00307-8. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112700003078>.

WHITE, P. S. Pattern, process, and natural disturbance in vegetation. **The Botanical Review**, vol. 45, no. 3, p. 229–299, Jul. 1979. DOI 10.1007/BF02860857. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/BF02860857>.

ZIELONKA, T.; HOLEKSA, J.; FLEISCHER, P.; KAPUSTA, P. A tree-ring reconstruction of wind disturbances in a forest of the Slovakian Tatra Mountains, Western Carpathians. **Journal of Vegetation Science**, vol. 21, no. 1, p. 31–42, Feb. 2010. DOI 10.1111/j.1654-1103.2009.01121.x. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1654-1103.2009.01121.x>

3. Fluxo médio de gases de efeito estufa do solo em áreas de *Blowdown* na Amazônia Central

3.1. Introdução

Apesar da grande resiliência da floresta Amazônica, o desmatamento e os fenômenos naturais têm causado sérias transformações nos últimos anos. De acordo com o sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER) do INPE (2022), no ano de 2022 o desmatamento nas áreas da Amazônia Legal Brasileira (ALB) foi de 11.568 km². Apesar de representar uma redução de 11 % na taxa de desmatamento quando comparado ao ano anterior, trata-se de uma grande área.

Nas últimas décadas, o clima mundial tem sofrido alterações devido às mudanças climáticas, principalmente no comportamento de variáveis como taxas de precipitação, temperatura e umidade do ar (Oertel et al., 2016). Estes fenômenos ocorrem em decorrência do aquecimento global, que é diretamente influenciado pelo aumento das emissões dos gases do efeito estufa (GEE's). Além dos prejuízos diretos causados por ações antropogênicas, existem também os efeitos indiretos decorrentes das mudanças climáticas. Todos os fatores mencionados afetam na dinâmica do funcionamento deste ecossistema, e promovem muitas vezes secas prolongadas e tempestades (Phillips et al., 2009; Bordon et al., 2019; Sullivan et al., 2020; Wigner et al., 2020).

Blowdown, *Downburst* ou roça de ventos é um distúrbio natural de grandes proporções com ocorrências registradas no mundo inteiro sendo no Brasil a região norte com mais registros de ocorrências. No ano de 2005, ocorreu uma grande tempestade, atingindo áreas da fronteira da Bolívia até o Oceano Atlântico, alcançando até o extremo oeste da Amazônia, sendo que os danos foram altamente concentrados no centro da Amazônia (Araújo et al., 2017).

Estima-se que em 2005 ocorreu uma mortalidade de $0,32 \pm 0,05$ milhões de árvores em uma área de 13.400 km² de floresta examinada em seu estudo na região de Manaus (Negrón-Juárez et al., 2010). Foi estimada a morte de 542 ± 121 milhões de árvores em toda a bacia Amazônica, ou seja, o equivalente a 23 % do acúmulo médio anual de biomassa estimado para essas florestas, destacando assim a

vulnerabilidade das árvores da Amazônia à mortalidade causada pelo vento associada a tempestades convectivas (Negrón-Juárez et al., 2010). Esse foi o resultado de chuvas torrenciais e ventos muito fortes (16 m s^{-1}) na estação seca. Esses eventos são responsáveis pela morte de muitas árvores e dependendo de suas proporções cria grandes clareiras em meio a floresta (Satyamurty et al., 2012; Espírito-Santo et al., 2014).

Além dos efeitos causados pelas tempestades convectivas, os ecossistemas Amazônicos sofreram ainda no segundo semestre de 2005 uma seca severa. Devido aos grandes períodos de seca, a Amazônia emitiu em 2005 e 2010, respectivamente, $1,6 \pm 0,8 \text{ Pg C}$ (IC 95%) e $2,2 \pm 1,2 \text{ Pg C}$ (IC 95%) (Phillips et al., 2009; Lewis et al., 2011). Diante disso nota-se a vulnerabilidade da floresta diante das mudanças climáticas, que traz como resultado a mortalidade de árvores e emissão de carbono para atmosfera (Negrón-Juárez et al., 2010).

Sabe-se que as florestas desempenham um papel extremamente importante principalmente no ciclo do carbono. Estima-se que as florestas do mundo possuam um estoque de C de $861 \pm 66 \text{ Pg C}$, sendo que 44% ($383 \pm 30 \text{ Pg}$) deste total está presente no solo até 1 m de profundidade, destes 55% ($471 \pm 93 \text{ Pg}$) estão presentes em florestas tropicais (Pan et al., 2011). A Floresta Amazônica brasileira é a maior floresta tropical do mundo, um dos maiores reservatórios de carbono terrestre do planeta (Feldpausch et al., 2012) abrangendo uma área de aproximadamente $7 \times 10^6 \text{ km}^2$. Portanto, qualquer mudança generalizada no balanço de carbono pode causar grandes impactos no clima global (Pan et al., 2011; Aragão et al., 2014; Castanho et al., 2016).

Compreender o comportamento da emissão de GEE's, torna-se necessário para diferentes fenômenos como o uso do solo e os distúrbios naturais. Muitos estudos que abordaram a emissão dos GEE's, provenientes dos solos, foram desenvolvidos ao longo dos anos, com principal enfoque nas emissões devido as mudanças de uso dos solos (Davidson; Ishida; Nepstad, 2004; Keller et al., 2005; Wick et al., 2005; Carmo et al., 2005; Davidson et al., 2008; Miércio et al., 2017). Essas informações associadas à caracterização da floresta pela criação de modelos, desenvolvimento e validação de metodologias, são utilizados para prever o comportamento do clima no mundo face as mudanças nas concentrações de CO_2 atmosférico, temperatura, disponibilidade de água, nutrientes e luz (Moore et al., 2020).

Assim, a hipótese proposta neste trabalho é que o *blowdown* perturba a condição inicial da floresta Amazônica, promove uma redução dos estoques de C e N e modifica a assinatura isotópica dos GEE's emitidos pelo solo. Dessa forma, a floresta em sua condição natural, apresenta os maiores estoques e as menores emissões de GEE's. Adicionalmente, acredita-se que após quinze anos de ocorrência do *blowdown*, a floresta ainda não atingiu a sua condição inicial.

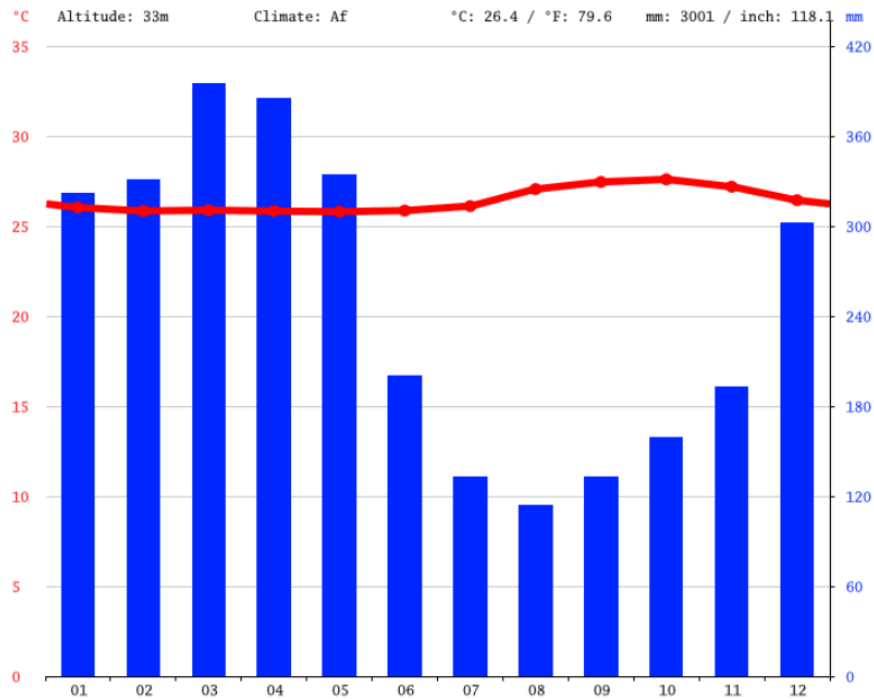
De modo que, objetivou-se avaliar a emissão de gases do efeito estufa, o carbono no solo e os atributos físicos do solo, a fim de compreender as mudanças que se manifestaram sob a influência do *blowdown* ao longo do tempo.

3.2. Material e métodos

3.2.1. Área de estudo

O clima predominante é do tipo tropical, classificado como Am (tropical chuvoso) de acordo com Köppen e Geiger (Peel et al., 2007). A pluviosidade média anual para a Microrregião de Manaus no ano de 2020 foi de 2100 mm, com temperatura média anual de 26,4 °C (INMET, 2021). Entre os meses de junho a setembro, apresenta-se uma estação seca, com uma precipitação média de 100 mm por mês, a precipitação mensal do ano de 2020 pode ser observada na Figura 13 (INMET, 2021)

Figura 13 - Precipitação mensal do ano de 2020 da estação automática situada em Manaus-AM. Fonte: INMET



Neste trabalho foram estudados dois diferentes tipos de áreas naturais: floresta nativa não perturbada e duas áreas onde ocorreram distúrbios naturais denominado de *blowdown*. Ambas as áreas de estudo estão localizadas na Estação Experimental de Silvicultura Tropical (EEST/INPA). A EEST está localizada cerca de 50 km, ao norte da cidade de Manaus, composta por uma área de 22.000 hectares de floresta de terra firme, influenciada pelas bacias do Rio Cuieiras e do Rio Negro (Andrade; Higuchi, 2009). A floresta nativa de referência trata-se de uma floresta de campina, localizada em 2°38'20.17"S, 60° 8'37.43"W, próximo as áreas de *blowdown* (Figura 14).

Figura 14 - Área de floresta não perturbada pelo distúrbio de vento



O *blowdown* é caracterizado como uma área de floresta de campina atingida por uma tempestade convectiva, tendo ocorrida em janeiro de 2005 na área da EEST (Figura 15a, (2°34'21.05"S,60°17'37.12"W). Em janeiro de 2019 uma nova tempestade convectiva ocorreu, (Figura 15b) próximo à área da base da EEST/INPA, derrubando ~ 3 a 4 ha de floresta, sendo estas áreas selecionadas para este estudo (2°37'47.70"S, 60°10'28.19"W).

Figura 15 - Áreas atingidas pelas tempestades convectivas a) *blowdown* ocorrido no ano de 2005 b) *blowdown* ocorrido no ano de 2020



a)



b)

O tipo de solo presente nas áreas de estudo é um Neossolo, de textura franco-arenosa, cujos percentuais das frações granulométricas podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 - Granulometria do solo nas áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), *blowdown* com queda em 2019 (BD1) e *blowdown* com queda em 2005 (BD15) nas diferentes profundidades

Prof. (cm)	Areia	Argila (%)	Silte
BD15			
0-10	84,5	4,5	10,9
10-20	82,3	5,5	12,0
20-30	74,0	11,2	14,7
30-50	65,13	16,2	18,6
BD1			
0-10	93,0	2,5	4,4
10-20	85,9	5,8	8,2
20-30	82,5	8,3	9,0
30-50	76,4	10,4	13,1
VNP			
0-10	86,3	4,6	9,0
10-20	79,70	10,43	9,87
20-30	75,40	11,68	12,92
30-50	74,74	12,10	13,15

A caracterização química dos solos utilizados neste estudo é muito semelhante entre as áreas escolhidas (Tabela 9). Os solos Amazônicos apresentam baixa disponibilidade de P, geralmente o P é mantido pelo aporte de material orgânico e posterior ciclagem dentro do ecossistema. O pH é característico de vegetações nativas apresentando elevada acidez, a qual é tamponada pela matéria orgânica do solo (CUNHA et al., 2022).

Tabela 9 - Caracterização química das áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), *blowdown* com queda em 2019 (BD1) e *blowdown* com queda em 2005 (BD15)

Prof. (cm)	P Mehlich (mg dm ⁻³)	K	Ca	Mg	Al	H+Al	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	pH
(mmol _c dm ⁻³)									
(mg kg ⁻¹)									
BD15									
0-10	-	0,012	2,63	4,34	4,50	30,96	8,75	28,00	3,98
10-20	-	0,009	3,29	5,43	5,70	32,96	7,00	17,50	4,33
20-30	-	0,007	4,06	6,70	7,10	35,36	-	-	4,15
30-50	-	0,006	3,29	5,43	5,70	33,04	-	-	3,60
BD1									
0-10	-	0,010	3,24	5,34	5,60	27,28	7,88	21,88	4,29
10-20	-	0,009	3,62	5,97	6,30	29,44	21,88	16,63	4,10
20-30	-	0,009	4,01	6,61	7,00	33,52	-	-	3,68
30-50	-	0,007	3,90	6,43	6,80	32,08	-	-	3,65
VNP									
0-10	-	0,009	4,50	7,42	7,90	35,04	17,50	17,50	4,17
10-20	-	0,009	4,28	7,06	7,50	37,68	7,00	8,17	4,09
20-30	-	0,008	4,01	6,61	7,00	39,68	-	-	3,69
30-50	-	0,023	3,84	6,34	6,70	31,76	-	-	3,77

3.2.2. Fluxo médio de gases do solo

As leituras para levantamento da emissão dos GEE's foram realizadas em cada área de estudo em dezembro de 2020. As bases das câmaras fechadas de cloreto de polivinil (PVC), com diâmetro de 30 cm por 7 cm de altura, contendo tampas também de PVC com volume de 2,55 dm⁻³, e dois orifícios (entrada e saída do fluxo de gases das amostras) foram instaladas em número de 6 por tratamento a uma distância de aproximadamente 20 metros uma da outra, inseridas diretamente no solo a uma profundidade de 3 cm, anteriormente a coleta de amostras, com o objetivo de estabilizar o sistema após a perturbação. O intervalo de tempo de retirada dos dados foi de 10 min, suficiente para estabilização da curva de gases no equipamento. Foram coletados ao longo da campanha em cada área de estudo três dias, contando com três horários (8-9, 10-11 e 14-15 horas), para efeitos de comparação os dados foram estudados considerando-se os dias (três dias de campanha) e os horários de estudo.

Foi utilizado simultaneamente o equipamento *Gasmet* modelo *DX4015* (Figura 16), que se constitui de um analisador portátil de gás com tecnologia FTIR (infravermelho por transformada de Fourier), ou seja, mede todos os comprimentos de onda IR simultaneamente e produz um espectro completo. Essa tecnologia permite a leitura instantânea dos gases CO_2 , CH_4 e N_2O mediante uma comparação com uma biblioteca.

Figura 16 - a) Operação do *Gasmet*, b) câmaras para análise de gases instalada para coleta no *Gasmet*; detalhe da operação do equipamento, em treinamento da doutoranda



a)



b)

Um analisador FTIR digitaliza simultaneamente todo o espectro infravermelho, dos gases que estão passando pela sua unidade de leitura (Figura 16). Em seguida, o software calcula as concentrações de cada gás na amostra, baseando-se na absorção característica de cada radical químico, que são comparados com a biblioteca padrão do equipamento de modo que, todos os gases da amostra podem ser medidos simultaneamente, porque todo o espectro infravermelho é varrido de uma só vez. Assim são realizadas as medições multicomponentes, sem que ocorra qualquer interferência cruzada.

Os dados provenientes das metodologias calculados conforme a equação de Clayperon:

$$pV = nRT \quad \text{Equação 1}$$

em que: p é a pressão (atm); V é o volume (L); n = número de mols do gás; R é a constante universal dos gases perfeitos e T é a temperatura absoluta.

3.2.3. Serrapilheira

Com o auxílio de um bastidor de 1 m², a serrapilheira foi amostrada nas proximidades dos locais, onde foram realizadas as leituras de fluxo de gases para se obter o valor médio de matéria seca depositada sobre o solo das áreas de estudo. As amostras foram levadas a estufa, secas a uma temperatura de 70 °C por 72 horas. Posteriormente, seu peso foi aferido em uma balança analítica.

3.2.4. Composição isotópica %C, % N, $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$

O solo e a serrapilheira foram levados para o Laboratório de Ecologia Isotópica do CENA/USP, onde as análises de concentração C e N total e $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ foram realizadas. A técnica utilizada neste estudo foi a Espectrometria de Massas de Razão Isotópica em Fluxo Contínuo, onde existe o acoplamento de um analisador elementar Carlo Erba CHN 1110 a um espectrômetro de massas para razão isotópica Delta Plus (*Thermo Scientific*). Neste equipamento, as razões isotópicas foram avaliadas depois da separação das moléculas em um campo magnético de acordo com suas massas isotópicas, que são finalmente comparadas às razões de

gases calibrados pelos padrões internos aferidos pelos padrões internacionais PDB (Farquhar; Ehleringer; Hubic, 1989).

Os resultados foram expressos na notação delta, em partes por mil (‰), conforme Equação 2:

$$\delta^{13}C \text{ ‰} = \left(\frac{R_{amostra}}{R_{padrão}} - 1 \right) \times 1000 \quad \text{Equação 2}$$

em que, $\delta^{13}C$ = isótopo (‰); R = razões isotópicas ($^{13}C/^{12}C$) das amostras e dos padrões.

De forma semelhante utilizou-se o $\delta^{15}N$ (‰), onde o R amostra é a razão isotópica $^{15}N/^{14}N$ da amostra e R padrão é a razão isotópica $^{15}N/^{14}N$ do padrão. O padrão é a abundância de ^{15}N no ar atmosférico.

3.2.5. Estoque de Carbono e Nitrogênio

O cálculo do estoque de carbono foi realizado conforme a Equação 3, sendo a área de floresta nativa utilizada como referência para corrigir a massa do solo nas demais áreas estudadas (Ellert; Bettany, 1995).

$$E = \frac{T \times Ds \times e}{10} \quad \text{Equação 3}$$

em que, E = estoque de carbono ou nitrogênio ($Mg \text{ ha}^{-1}$); T = teor de carbono ou de nitrogênio ($g \text{ kg}^{-1}$); Ds = densidade do solo ($g \text{ cm}^{-3}$); e e = espessura da camada do solo (cm).

3.2.6. Fracionamento granulométrico da MOS do solo

As amostras de solo indeformadas passaram pelo processo de fracionamento físico, sendo consideradas duas frações *i*) matéria orgânica particulada (MOP) e *ii*) matéria orgânica aderida ao mineral (MOAM) em três repetições, seguindo o método de tamanho de partícula (Cambardella; Elliott, 1992). Foram utilizados 15 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}), adicionados a 5 g de solo, previamente peneirados a 2 mm (TFSA). O material foi acondicionado em tubos do

tipo Falcon, onde acrescentou-se uma bola de vidro e passaram por dispersão física com o auxílio de um agitador horizontal por 16 h a uma rotação de 140 rpm. Em seguida, a solução dispersa foi separada em peneira com malha de 53 μm de tamanho. A fração grossa ($> 53 \mu\text{m}$ - MOP) retida na peneira e o material lavado ($< 53 \mu\text{m}$ - MAOM) foram secos em estufa a 50 °C e moídos em granulometria ($< 0,15 \text{ mm}$) para determinação do C.

As concentrações totais de C e N das amostras de fracionamento de solo foram moídas e peneiradas em malha de 0,15 mm, e foram então submetidas ao método pelo método de combustão a seco usando um analisador elementar para determinação dos teores de C e N, chamado *LECO CN-2000*.

3.2.7. Atributos físicos do solo

No estudo dos atributos físicos do solo, utilizou-se amostras indeformadas e deformadas. As amostras indeformadas foram coletadas com auxílio de um amostrador do tipo Uhland, compreendendo uma amostragem por câmara de coleta de gases. As amostragens foram realizadas em mini trincheiras, abertas após a finalização da coleta de gases do solo. As profundidades amostradas consistiram em 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm.

Os atributos físicos dos solos estudados foram analisados no Laboratório de Física de Solos, do Departamento de Engenharia de Biosistemas (ESALQ/USP). As variáveis determinadas foram *i)* densidade do solo, *ii)* porosidade total, *iii)* macroporosidade, *iv)* mesoporosidade, *v)* microporosidade, *vi)* condutividade hidráulica do solo saturado - K_{sat} *vii)* ponto de murcha permanente, *viii)* conteúdo de água disponível, *ix)* resistência do solo à penetração de raízes, *x)* capacidade de aeração do solo e, por fim, *xi)* capacidade de aeração e de ar do solo.

3.2.8. Densidade do solo

A densidade do solo (ρ) foi determinada pelo método do anel volumétrico. As amostras foram secas em estufa a uma temperatura de 105 °C por 48 h, para conhecimento da massa de solo seco (Blake; Hartge, 1986). Foram considerados

para cálculo, a razão entre a massa de solo seco (M_s) e volume do solo no cilindro (V). O cálculo da (ρ) densidade foi realizado segundo a Equação 4.

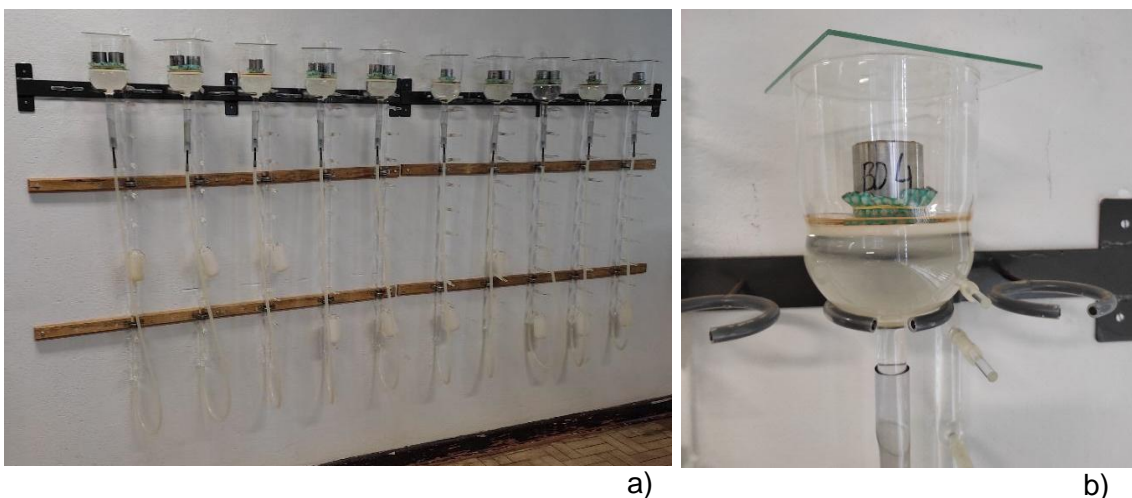
$$\rho = \frac{M_s}{V} \quad \text{Equação 4}$$

em que, ρ = densidade do solo (g cm^{-3}); M_s = massa de solo seco a $105\text{ }^\circ\text{C}$ (g); e V = volume do anel ou cilindro (cm^{-3}).

3.2.9. Porosidade do solo

Para determinação da macroporosidade e microporosidade do solo, amostras indeformadas foram saturadas e equilibradas nos potenciais mátricos de -4 e -10 kPa, respectivamente, por meio de Funis de Haines (Figura 17). Os Funis são dispositivos de vidro contendo em seu interior uma placa porosa que permite a aplicação de uma determinada sucção. As amostras atingiram o equilíbrio em torno de 3 a 5 dias, dependendo do potencial analisado e na sequência foram pesadas, e o conteúdo de água no solo determinado por gravimetria e multiplicados pela densidade do solo para obtenção do conteúdo volumétrico de água nos potenciais analisados.

Figura 17 - Funis de Haines utilizados durante as análises de macroporosidade e microporosidade, a) estrutura completa b) Funil de Haines em detalhes com uma amostra indeformada correspondente a uma área de *blowdown*



3.2.10. Condutividade hidráulica do solo saturado

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) foi obtida a partir de um permeâmetro de carga constante (Klute, 1965). As amostras indeformadas foram saturadas (por ascensão capilar) por 48h, utilizando-se água deionizada e deaerada. Na sequência, as amostras foram submetidas a uma lâmina de água constante mantida na superfície da amostra, até se atingir a condição de *steady-state* (Figura 18). Uma vez determinado o volume de água que representava o fluxo constante, o K_{sat} foi calculado conforme a equação 5 de Darcy-Buckingham:

$$K_{sat} = \frac{V_A L}{A_t (h+L)} \quad \text{Equação 5}$$

em que: V_A (mL) = volume de água coletado no tempo t (h); A (cm²): área da secção transversal da amostra; L (cm): comprimento da amostra; e h (cm): potencial de pressão, ou seja, carga hidráulica no topo da amostra. Os dados foram uniformizados para seguir uma distribuição normal, com os valores de K_{sat} trabalhados e analisados em base logarítmica.

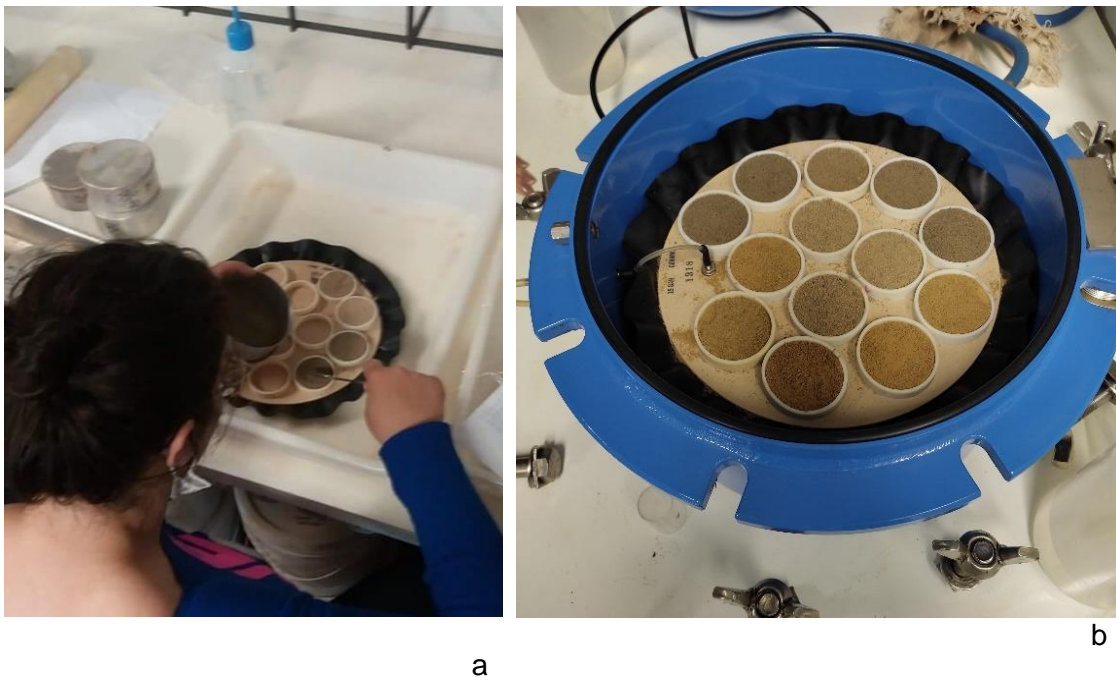
Figura 18 - Método do permeâmetro de carga constante para estudo da condutividade hidráulica do solo saturado e estrutura com duas entradas acessórias para dois frascos de *Mariotte* acoplados a uma flauta com saídas de água para aplicação da carga hidráulica



3.2.11. Ponto de murcha permanente

O ponto de murcha permanente (PMP) foi obtido em amostras deformadas (TFSA) saturadas e submetidas a uma pressão de -1500 kPa em câmaras de pressão de Richards (Klute; Dirksen, 1986) (Figura 19). As amostras permaneceram na câmara por um período de uma semana, com espera de três dias adicionais para sua retirada, de modo que o equilíbrio hidráulico fosse estabelecido. Assim, as amostras foram retiradas da câmara e seu conteúdo de água determinado por gravimetria.

Figura 19 - Processo de a) preparo e montagem das amostras em placa porosa e b) inserção do conjunto de amostras na câmara de pressão de Richards para determinação do ponto de murcha permanente



3.2.12. Capacidade de campo

Neste estudo, a capacidade de campo (CC) foi considerada como o conteúdo de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) equilibrado no potencial mátrico de -10 KPa, determinado com o auxílio dos Funis de Haines.

3.2.13. Resistência do solo a penetração

A resistência do solo a penetração (RP) foi determinada no laboratório de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo (ESALQ/USP). Amostras indeformadas foram saturadas, equilibradas no potencial mátrico de -10 kPa (considerado o potencial referente à CC). As medidas da RP foram realizadas com o uso de um penetrômetro eletrônico de bancada (*Brookfield*, modelo CT3) com um atuador *linear-Electrak* 2000 acoplado a uma célula de carga (10 kgf), conectado a um computador, com o software específico para aquisição dos dados. Os ensaios foram realizados em uma velocidade constante de penetração de 0,1667 mm s⁻¹, com cone de 4 mm de diâmetro da base (12,56 mm²) e semiângulo de 30°, e a resolução da coleta de dados foi correspondente a cada segundo (Figura 20).

A RP foi obtida pelo quociente da força aplicada ao cone, medida pela célula de carga pela área da base do cone (Pa). Os dados obtidos foram corrigidos conforme o seu conteúdo de água e densidade do solo utilizando o pacote “*soilphysics*” do R (Silva; Lima, 2017).

Figura 20 - Penetrômetro eletrônico do Laboratório de Física do Solo da ESALQ, utilizado nas determinações de resistência do solo a penetração, ao analisar uma amostra da área de BD1



3.2.14. Capacidade de aeração do solo e Capacidade de ar do solo

A capacidade de ar do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) foi estabelecida como diferença entre a porosidade total e a capacidade de campo. A capacidade de aeração do solo (CAS) foi determinada conforme Reynolds et al. (2002), onde a CAS (%) é caracterizada pela diferença entre a porosidade total do solo e a capacidade de campo, dividida pela porosidade total. De modo a obtermos o % de ocupado por ar na porosidade total, em condições de capacidade de campo.

3.2.15. Delineamento experimental e análise estatística

Os dados foram analisados com base em um delineamento sistemático conforme descrição de Alvarez e Alvarez (2013), onde cada tratamento corresponde a uma área de estudo: vegetação nativa não perturbada (VNP), *blowdown* 15 (BD15), *blowdown* 1 (BD1), contando com 6 repetições; perfazendo um total de 18 unidades experimentais. Os dados foram submetidos a análise de variância, e foi realizado o teste de Tukey para comparação entre os valores médios. Além disso, para análise do estoque de C de 0-50 cm as comparações se deram através do intervalo de confiança para média. Cada repetição foi distribuída ao longo de um transecto com distância de 50 m entre os pontos de coleta.

3.3. Resultados e discussão

3.3.1. Gases do solo

Para melhor compreensão da campanha de amostragem do fluxo médio dos gases do efeito estufa, os dados foram explorados levando em consideração os dias (3) (Figura 21) e horários de coletas (3) (Figura 22). De modo geral autores priorizam coletas de gases em uma faixa de horário ideal que deve contemplar o horário mais representativo do dia, a fim de aprimorar a logística para leituras em múltiplas áreas. Contudo, para compreensão das áreas de *blowdown*, não foram encontradas referências bibliográficas. Portanto, optou-se por cobrir três diferentes faixas de horário, observando assim as variações ao longo do dia.

Nos fluxos médios de C-CO₂ o BD1 apresentou maior fluxo médio ao longo da campanha de três dias (Figura 21). No primeiro dia, o fluxo do BD1 foi aproximadamente 20% superior do que no BD15 e VNP (102,6±11,0; 85,3±9,4 e 86,7±5,7 C-CO₂ mg m⁻² h⁻¹, respectivamente). No terceiro dia observou-se o mesmo comportamento, porém o fluxo médio do BD1 foi superior ao BD15 em 32%, e 22% no VNP (84,3±5,4, 68,7±4,7 e 63,6±6,1 C-CO₂ mg m⁻² h⁻¹, respectivamente). No segundo dia de coletas houve diferença estatística entre o BD1 e a VNP, porém ambos não diferiram estatisticamente do BD15 (85,1±5,1, 64,1±3,4 e 76,57±7,2 C-CO₂ mg m⁻² h⁻¹ respectivamente). Ao longo dos três dias, o BD1 apresentou maior

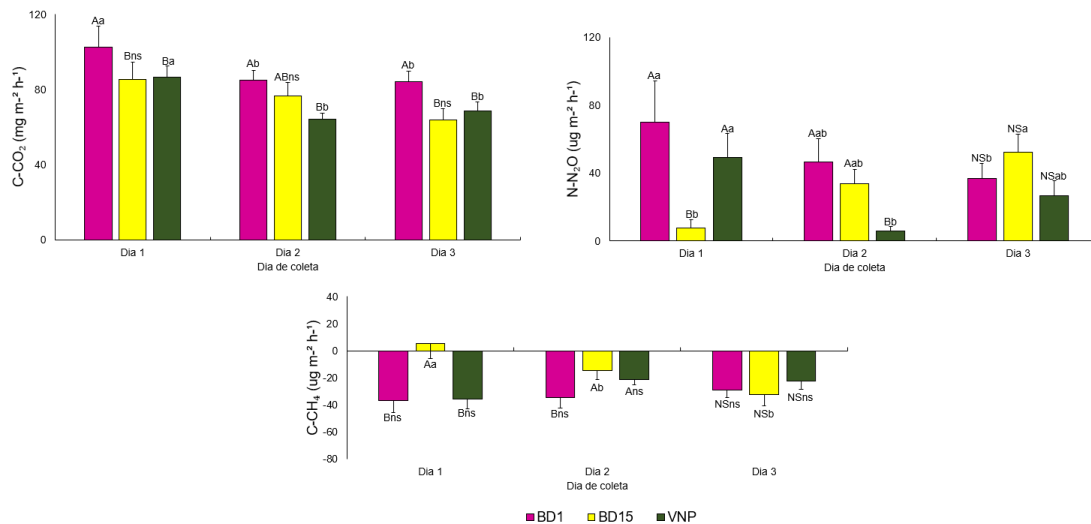
fluxo médio no primeiro dia de coleta, bem como o VNP. Já no BD15 não houve diferença estatística ao longo dos três dias.

Nos fluxos médios de N-N₂O, avaliando-se o dia (Figura 21), o BD1 junto ao VNP foram os maiores valores ($69,99 \pm 24,17$ e $49,40 \pm 13,86$ N-N₂O $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) para o primeiro dia de avaliação. No segundo dia observou-se maiores valores no BD1 e BD15 ($69,99 \pm 24,17$ e $49,40 \pm 13,86$ N-N₂O $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$). No terceiro dia, não houve diferença estatística entre as áreas de estudo.

Comparando-se os tratamentos nos diferentes dias o BD1 apresentou diferença estatística entre o primeiro dia de coleta e o terceiro dia ($69,9 \pm 24,1$ e $36,7 \pm 36,7$ N-N₂O $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$). (Figura 21). O BD15 apresentou uma tendência de aumento no fluxo no decorrer das coletas ($7,52 \pm 5,2$, $33,7 \pm 8,5$ e $52,2 \pm 10,5$ N-N₂O $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$). A VNP apresentou maior fluxo médio no primeiro dia e menor fluxo médio no segundo dia ($49,4 \pm 13,8$ e $26,5 \pm 8,8$ N-N₂O $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$).

O comportamento do C-CH₄ foi caracterizado pelo consumo nas áreas de estudo (Figura 21). No primeiro dia de campo, o consumo médio foi maior no BD1 e VNP, não diferindo estatisticamente ($-36,5 \pm 9,2$ e $-35,8 \pm 7,0$ C-CH₄ $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$). O consumo médio no segundo dia foi maior no BD1 ($-34,6 \pm 7,5$ C-CH₄ $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$), enquanto no dia 3 não houve diferença estatística entre os tratamentos.

Figura 21 - Fluxos médios para os três dias de campanha de campo, realizada em cada área de estudo. Valores médios seguidos do erro padrão, para o fluxo médio dos gases C-CO₂, C-CH₄ e N-N₂O emitidos pelo solo. Letras maiúsculas comparação entre diferentes tratamentos no mesmo dia; letras minúsculas comparação entre diferentes dias dentro do mesmo tratamento, de acordo com o teste de Tukey ($p > 0,05$)

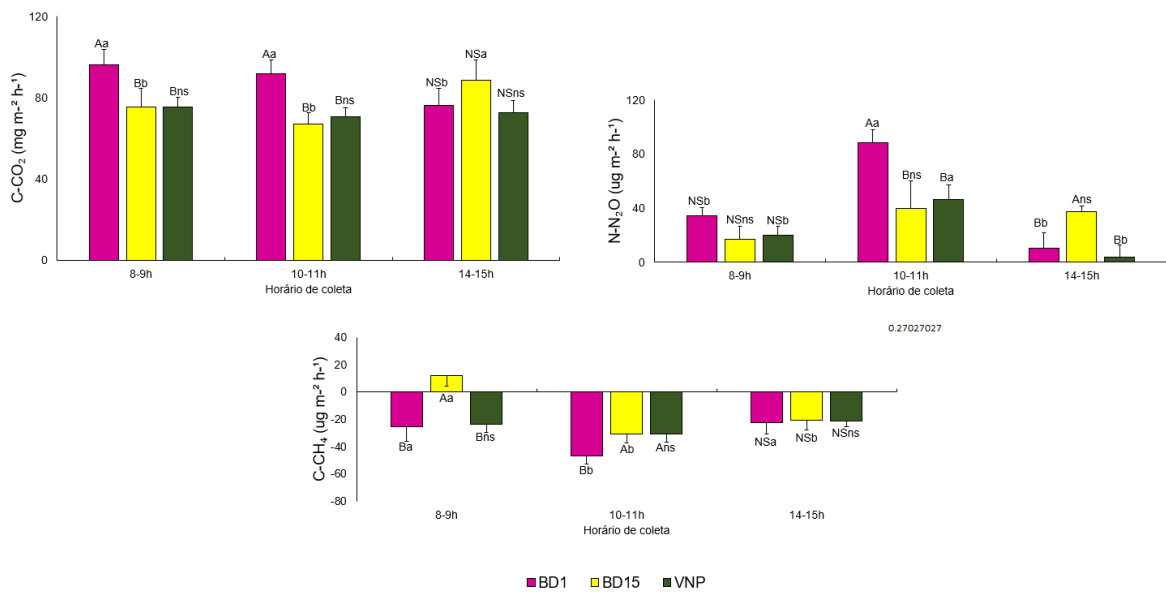


Os fluxos médios de C-CO₂ nos horários de 8-9 h e 10-11 h o BD1 obteve os maiores valores, $96,3 \pm 7,3$ e $91,6 \pm 6,7$ C-CO₂ mg m⁻² h⁻¹ respectivamente (Figura 22), enquanto nas áreas de VNP e BD15 os fluxos foram semelhantes não havendo diferença estatística. Quando confrontados os dias para cada área de estudo a VNP apresentou o mesmo comportamento não existindo diferença estatística, entre os dias de coleta. Já para BD1 e BD15 os maiores fluxos médios ocorreram no primeiro e terceiro dia ($96,3 \pm 7,3$ e $88,6 \pm 9,9$ C-CO₂ mg m⁻² h⁻¹ respectivamente) (Figura 22).

No primeiro horário o N-N₂O (8-9 h) não houve diferença significativa entre os tratamentos (Figura 22). No horário de 10-11 h o BD1 apresentou o maior fluxo médio ($88,6 \pm 20,2$ N-N₂O µg m⁻² h⁻¹) sendo aproximadamente 50 % superior as outras áreas. No terceiro horário o BD15 obteve o maior fluxo médio ($37,5 \pm 1,19$ N-N₂O µg m⁻² h⁻¹) sendo aproximadamente 27 % superior as demais áreas. Comparando-se a mesma área nos diferentes horários BD15 não houve diferenças estatísticas; no BD1 e VNP o maior fluxo médio ocorreu no horário de 10-11 h ($88,6 \pm 20,2$ e $37,5 \pm 1,19$ N-N₂O µg m⁻² h⁻¹ respectivamente).

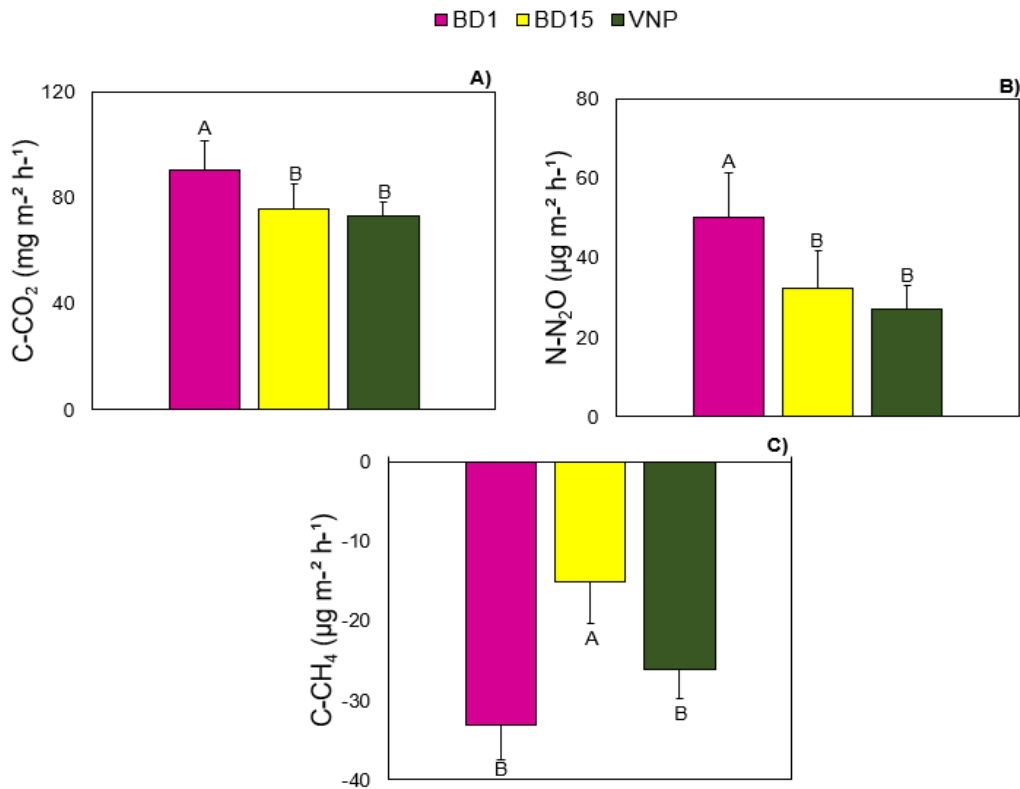
Os fluxos médios de C-CH₄ no primeiro horário de coleta (8-9 h) o BD15 foi a única área a apresentar fluxo médio positivo (11,7±11,0 C-CH₄ µg m⁻² h⁻¹), apresentando diferença estatística dos tratamentos BD1 e VNP (-25,3±7,3 e -23,7±5,8 C-CH₄ µg m⁻² h⁻¹) (Figura 22). No segundo dia o consumo de metano foi maior no BD1 (-46,9±6,4 C-CH₄ µg m⁻² h⁻¹).

Figura 22 - Fluxos médios por horário de coleta durante os dias da campanha de campo. Valores médios seguidos do erro padrão, para o fluxo médio dos gases C-CO₂, C-CH₄ e N-N₂O emitidos pelo solo. Letras maiúsculas comparação entre diferentes tratamentos no mesmo dia; letras minúsculas comparação entre diferentes dias dentro do mesmo tratamento, de acordo com o teste de Tukey (p>0,05)



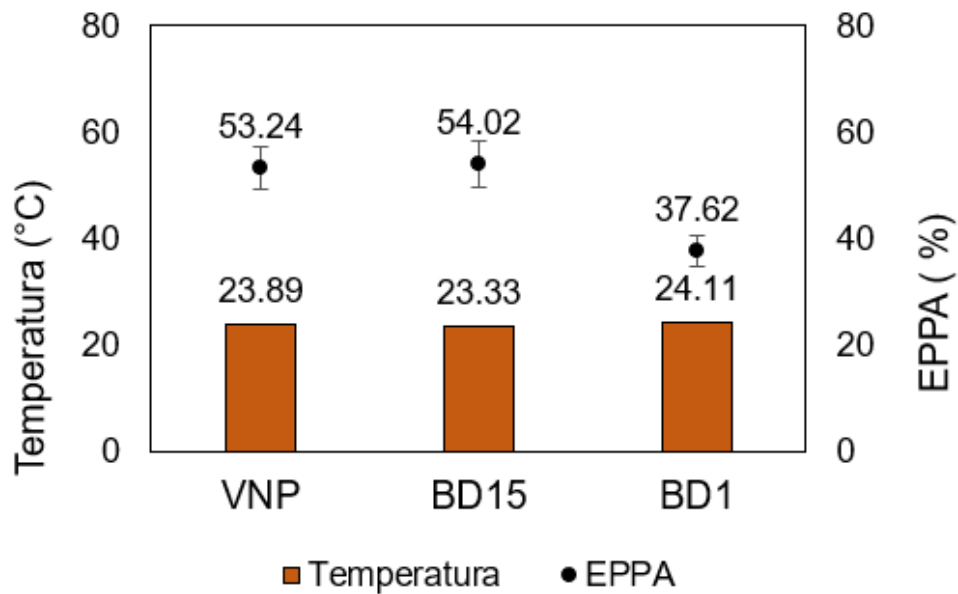
Reunindo-se todos dias e horários, os fluxos médios totais da campanha para o BD1, BD15 e VNP foram 90,3±4,3, 75,6±4,5, 73,0±3,1 C-CO₂ mg m⁻² h⁻¹; 50,2±9,4, 32,2±5,4 e 27,1 N-N₂O µg m⁻² h⁻¹, -33,0±4,3, -15,0±5,2 e -26,1±3,6 C-CH₄ µg m⁻² h⁻¹ respectivamente (Figura 23).

Figura 23 - Fluxos médios totais da área de floresta não perturbada (VNP), *blowdown* ocorrido em 2005 (BD15) e 2019 (BD1). Valores médios seguidos do erro padrão, para o fluxo médio dos gases C-CO₂, C-CH₄ e N-N₂O emitidos pelo solo. Letras maiúsculas comparação entre diferentes tratamentos de acordo com o teste de Tukey (p>0,05)



Na Figura 24 observou-se que o EPPA e foi semelhante nas áreas de BD15 e VNP (53,2 e 54,0 %), sendo que a área de BD1 é inferior aproximadamente 30 % que as demais áreas (37,6 %). No decorrer do estudo a temperatura do solo variou entre 22 e 26 °C, levando em consideração as três áreas. Os valores médios para BD1, BD15 e VNP foram 24,11, 23,8 e 23,3 °C respectivamente (Figura 24).

Figura 24 - Temperaturas médias e Espaço Poroso Preenchido Por Água (EPPA) da área de floresta não perturbada (VNP), *blowdown* ocorrido em 2005 (BD15) e 2019 (BD1)



Para a produção de CH_4 e N_2O são necessárias condições anaeróbicas. A produção de CH_4 correlaciona-se positivamente com a porosidade preenchida por água (%), requerendo condições estritamente anaeróbicas (Furtado Neto et al., 2019; Gao et al., 2014) e em condições aeróbicas os solos possuem a capacidade de ser sumidouros de CH_4 (Whitman; Bowen; Boone, 2006).

As bactérias, responsáveis pelo processo de nitrificação, precisam de oxigênio. Em solos com menores conteúdos de água, favorecendo o processo de nitrificação, de modo que a nitrificação gera um potencial maior para a produção de NO do que para a produção de óxido nítrico (Chapuis-Lardy et al., 2007; Ussiri; Lal, 2013). Gao et al. (2014) ao estudarem a emissão de N_2O em sistemas de cultivo alternativos e otimizados na China, observaram que a produção do gás é reduzida a partir dos 30% de porosidade preenchida por água. Períodos de seca prolongados podem reduzir significativamente as emissões do solo, transformando-os então em um consumidor de N_2O (Davidson et al., 2000; Ussiri; Lal, 2013).

Um outro fator de extrema importância é a agregação do solo que possui uma relação com a emissão de GEE's pois através dos seus índices é possível inferir o quanto o C e N estão protegidos fisicamente dentro dos agregados, impossibilitando

assim que os microrganismos acessem esse substrato para seu desenvolvimento, o processo de agregação torna os solos importantes mitigadores das principalmente das emissões de gás carbônico (Lal, 2007).

Nos fluxos médios de C-CO₂ acompanhados durante os dias (Figura 10) observa-se uma tendência de proximidade entre as áreas de BD15 e VNP, essa mesma tendência observa-se quando se avaliaram os diferentes horários de coleta (Figura 11); enquanto a área de BD1 possui as maiores emissões de C-CO₂. Esse comportamento pode ser justificado pelo grande aporte recente de material na área de BD1, que no momento da coleta estava com cerca de 1 ano.

No BD1 o solo encontrava-se em uma condição frágil, por não estar protegido pela floresta, devido a sua queda. Assim, a área fica propensa a oscilações de temperatura e umidade dos solos. A partir das 15h as temperaturas na floresta começavam a mudar e essa mudança é mais brusca na condição do BD1.

3.3.2. Serrapilheira e solos (CN)

A quantidade de serrapilheira depositada nas áreas não apresentaram diferenças entre os tratamentos, com valores respectivos de $4,72 \pm 0,35$; $3,60 \pm 0,53$ e $4,75 \pm 0,34$ Mg ha⁻¹ para BD15, BD1 e VNP. Os percentuais de carbono e nitrogênio também não diferiram estatisticamente ($48,80 \pm 0,52$; $47,1 \pm 0,7$ e $49,4 \pm 1,1$ % C e $1,6 \pm 1,63$; $1,6 \pm 0,09$ e $1,7 \pm 0,1$ % N para BD15, BD1 e VNP respectivamente). Quando ao $\delta^{13}\text{C}$, todos os tratamentos apresentaram a assinatura típica de plantas C3 (aproximadamente -31 ‰) (Tabela 10).

Tabela 10 - Resultados para as variáveis delta nitrogênio¹⁵, delta carbono¹³ encontradas na análise de serrapilheira, nas áreas de estudo

	$\delta^{15}\text{N}$		$\delta^{13}\text{C}$	
BD15	$3,64 \pm 0,24$	a	$-31,43 \pm 0,21$	ab
BG2019	$2,37 \pm 0,16$	b	$-31,63 \pm 0,22$	a
VNP	$1,64 \pm 0,22$	b	$-30,70 \pm 0,21$	b

Colunas seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente, conforme o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

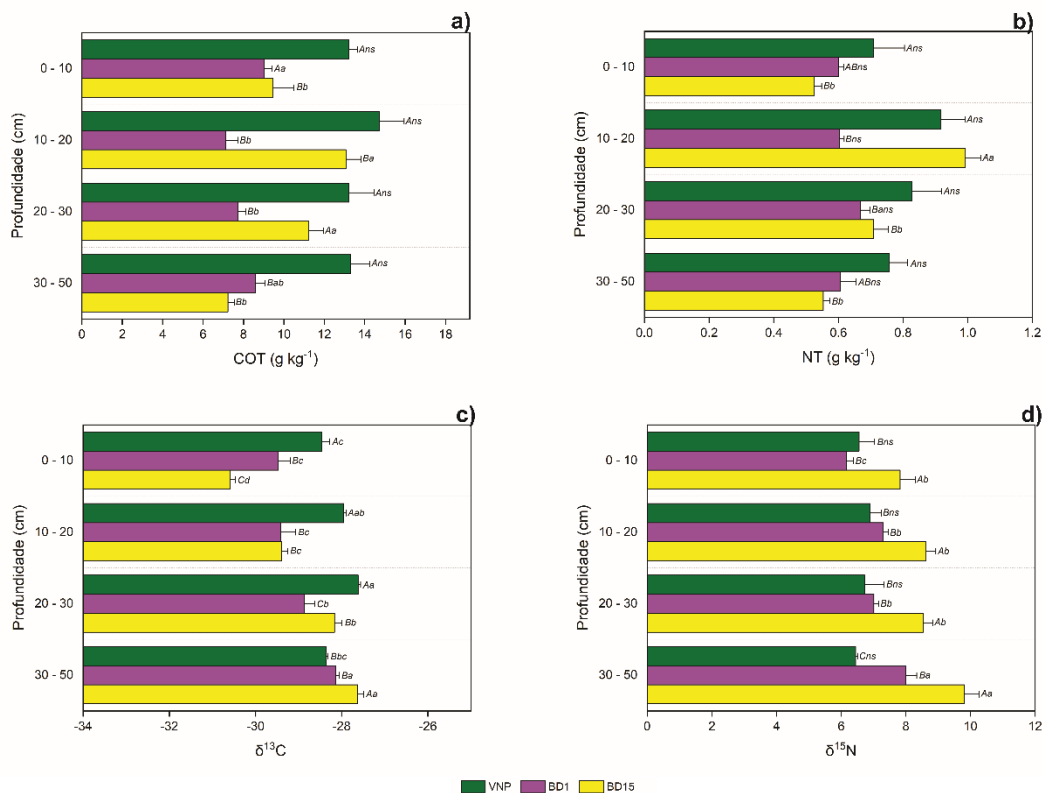
O tratamento VNP apresentou valores similares de COT ao longo das profundidades analisadas, não diferindo estatisticamente (Figura 25). O COT na profundidade 10-20 e 30-50 cm foi superior no tratamento VNP. Já para tratamento BD15 observa-se maior teor de COT nas camadas 10-20 e 20-30 cm. Para o tratamento BD1, a camada 0-10 cm apresentou maior valor de COT. Na profundidade 20-30 cm, a área atingida por *blowdown* em 2019 apresentou o menor teor de C. Ainda para o tratamento BD1, o maior valor de COT foi observado na superfície do solo e essa dinâmica pode estar relacionada ao recente distúrbio ocorrido em 2019.

Em estudo de Siqueira-Neto et al. (2020) numa área de Cerrado, a vegetação nativa comparada a áreas agrícolas apresentou maior teor de C e N. Nas camadas mais superficiais os autores encontraram valores na ordem de 36,0 g kg⁻¹ C e 3,4 g kg⁻¹ N, enquanto na camada 20-30 cm, 20 g kg⁻¹ C e 1,5 g kg⁻¹ N. Santos et al. (2022) observaram COT em vegetação nativa em três locais de estudo na região do MATOPIBA na ordem de 35, 18 e 20 g kg⁻¹ C.

O COT na profundidade 0-10 m a área de VNP foi superior, sendo a área BD1 10-20 m a que apresentou menor teor (Figura 25a). O comportamento do COT no perfil dos solos de cada área estudada VNP e BD1 não houve diferenças entre as camadas; BD15 o COT do solo foi superior nas camadas de 10-20 e 20-30m.

Para NT no perfil dos solos, tanto no tratamento VNP quanto no BD15 não se observou diferença estatística ao longo do perfil (Figura 25b). Para o tratamento BD1, o maior teor de N foi observado na camada 10-20 cm. Constatou-se maior teor de N no tratamento VNP para as camadas 20-30 e 30-50 cm. Já na camada 0-10 cm os tratamentos VNP e BD1 não apresentaram diferença estatística para o teor de N, bem como na camada 10-20 cm não se observou diferença estatística entre VNP e BD15.

Figura 25 - a) Carbono orgânico total do solo, b) nitrogênio total do solo e os isótopos estáveis de c) ^{13}C e d) ^{15}N para vegetação nativa não perturbada (VNP), *blowdown* com queda em 2019 (BD1) e *blowdown* com queda em 2005 (BD15). Onde as barras de erro correspondem ao desvio padrão; letras maiúsculas comparação entre diferentes profundidades dentro do mesmo tratamento; letras minúsculas comparação entre diferentes tratamentos na mesma profundidade; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; de acordo com o teste de Tukey ($p>0,05$)



O perfil do solo estudado, a variável $\delta^{13}\text{C}$ apresentou diferenças entre as áreas de estudo (Figura 25d). Para VNP houve diferença estatística dentro entre as profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 cm denotando uma diferença crescente com aumento de profundidade, com valores médios respectivos de -28,4, -27,9, -27,6 ‰; no entanto a camada de 30-50 cm apresentou uma assinatura isotópica de -28,4 ‰ não diferindo das camadas de 0-10 e 10-20 cm. No BD1 à medida que se aumenta a profundidade gradativamente o carbono fica mais pesado, não diferindo estatisticamente as duas primeiras profundidades e com valores médios de -29,4 e -29,4 ‰, já profundidades de 20-30 e 30-50 cm apresentaram os valores

respectivos de -28,8 e -28,1 ‰ diferindo estatisticamente de todas as profundidades. No BD15 existe diferença estatística entre todas as profundidades com os valores médios de -30,5, -29,3, -28,1 e -27,6 ‰, nas respectivas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm.

Quando se comparam as áreas de estudo dentro de cada profundidade foram encontrados: i) 0-10 m, nesta profundidade cada área apresenta um $\delta^{13}\text{C}$ diferente estatisticamente, com os valores médios -28,6, -29,9 e -30,6 ‰ para VNP, BD1 e BD15 respectivamente. ii) 10-20 cm - a área VNP possui assinatura de -27,95 ‰ diferindo estatisticamente das camadas no BD15 (-29,39) e BD1 (-29,42). iii) 20-30 m - as áreas diferiram estatisticamente. iv) 30-50 cm – as áreas VNP e BD1 não diferiram entre si, apenas BD15 (Figura 25c).

Conforme a literatura, é esperado que à medida que se aumenta a profundidade do solo é explorada valores mais enriquecidos em $\delta^{13}\text{C}$, em comparação a superfície do solo.

Em solos tropicais, o $\delta^{15}\text{N}$ no solo enriquece conforme a profundidade. São comuns diferenças de 8 ‰ entre os valores de $\delta^{15}\text{N}$ da superfície em relação as camadas mais profundas do solo (Martinelli et al., 2009). Para o tratamento BD15 e BD1 se observou um maior valor de $\delta^{15}\text{N}$ na camada 30-50 cm, enquanto o tratamento VNP não apresentou diferença significativa.

Na camada superficial (0-10 cm), não existiram diferenças entre os tratamentos, um dos fatores que possui relação é a textura do solo (franco-arenoso), que associada a condições tropicais típicas apresenta-se a promoção facilitada da degradação e carreamento via água da MOS, ocorrendo de forma mais intensa e rápida na camada superficial. Já as camadas de 10-20, 20-30 e 30-50 cm a VNP com valores estatisticamente superiores, esse fato pode ser explicado graças ao aporte constante de material que a floresta fornece, mantendo o input de carbono constante, o que se reflete ao longo do perfil uma vez que os valores encontrados aumentam com a profundidade, o que é esperado conforme a textura do solo (Tabela 11).

Tabela 11 - Valores médios seguidos do erro padrão para as variáveis estoque de C e estoque de N do solo. Letras maiúsculas comparação entre diferentes tratamentos na mesma profundidade; letras minúsculas comparação entre diferentes profundidades dentro do mesmo tratamento; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; de acordo com o teste de Tukey ($p > 0,05$)

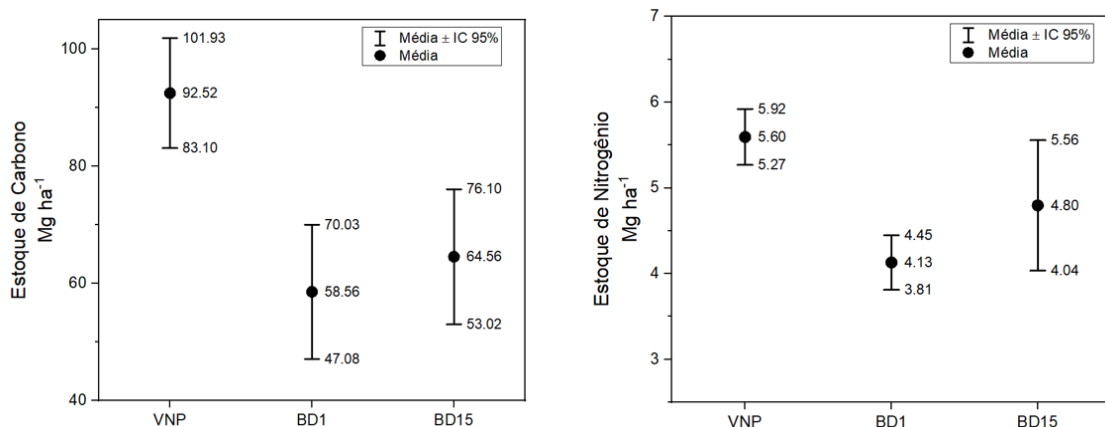
Profundidade	Área de estudo	Estoque C Mg ha ⁻¹			Estoque N Mg ha ⁻¹		
0-10 cm	BD1	12,23	± 1,54	NSb	0,82	± 0,08	NSb
	BD15	12,64	± 4,14	NSb	0,71	± 0,08	NSc
	VNP	16,62	± 1,65	NSb	0,94	± 0,24	NSb
10-20 cm	BD1	13,15	± 1,13	Bb	0,80	± 0,14	Bb
	BD15	19,72	± 4,51	ABb	1,24	± 0,32	Aab
	VNP	20,33	± 4,64	Ab	1,10	± 0,27	ABb
20-30 cm	BD1	13,53	± 3,86	Bb	0,87	± 0,12	NSb
	BD15	14,17	± 2,02	Bb	1,03	± 0,11	NSbc
	VNP	21,44	± 8,06	Ab	1,10	± 0,29	NSb
30-50 cm	BD1	28,02	± 6,24	Ba	1,90	± 0,24	ABa
	BD15	27,46	± 6,00	Ba	1,61	± 0,22	Ba
	VNP	36,65	± 7,67	Aa	2,09	± 0,50	Aa

NS - Indica que que não houve diferença entre as médias para a profundidade; ns - indica que que não houve diferença entre as médias para no tratamento; letras minúsculas comparação entre diferentes tratamentos na mesma profundidade, conforme teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Considerando-se o perfil inteiro de 0-50 cm (Figura 26) fica evidente que a magnitude da diferença dos estoques entre as áreas que determina VNP como maior estoque 92,52 Mg ha⁻¹, quando comparado as áreas BD15 e BD1 58,56 e 64,56 Mg ha⁻¹ respectivamente. Santos et al. (2016) determinaram os estoques de carbono, após 7 anos de distúrbio, em áreas de Latossolos onde ocorreu *blowdown* em solo argiloso, encontrando de 0-30 cm 61.4 ± 8.2 Mg ha⁻¹ e 47.7 ± 13.6 Mg ha⁻¹ (intervalo de confiança para a média $\pm 95\%$), em áreas onde ocorreu o distúrbio e área controle, respectivamente. Essa área difere em termos de vegetação, este estudo foi conduzido em uma área de Campinarana, além disso, os solos são franco arenosos, o que modifica a mineralização da MOS nos solos.

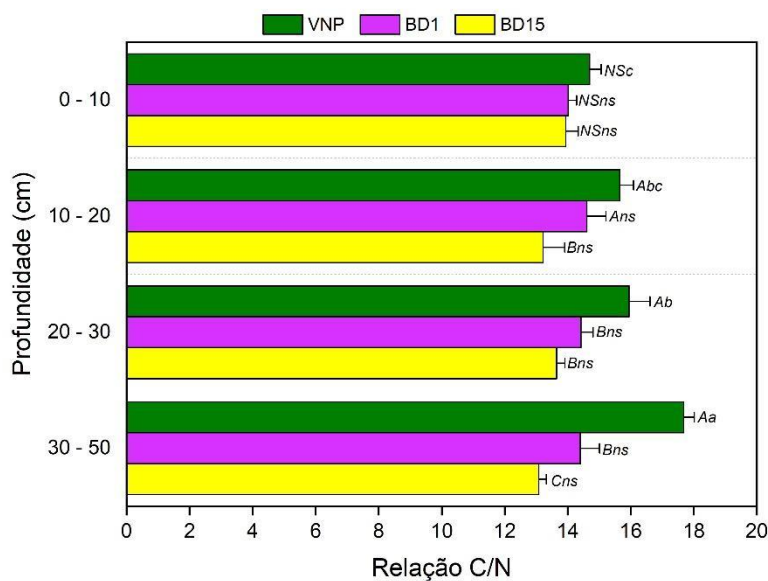
O distúrbio causado pela queda da vegetação, ocasiona rápida mineralização do carbono lábil da MOS, que por sua vez emite gases e afeta a ecologia das populações de microrganismos nos solos. Como o input de carbono e nitrogênio é muito grande, e dadas as condições de clima, uma possibilidade é o estímulo de microrganismos K estrategistas que a partir do momento em que são estimulados passam a consumir a MOS na sua condição refrataria (Brady; Weil, 2017). Portanto consumindo o estoque de material mais estabilizado, além disso, existe a possibilidade de lixiviação, uma vez dissolvida na água a MOS atravessa o perfil do solo indo parar em rios igarapés.

Figura 26 - Estoques de carbono e nitrogênio considerando o perfil do solo 0 - 50 cm de profundidade, com intervalo de 95 % de confiança para a média



Um outro fator importante para estudos dos gases no solo é a relação C/N do solo a qual pode ser observada na Figura 27. Em geral os valores se situam entre 12 e 18; nesta faixa a mineralização da MOS é beneficiada. O maior valor encontrado para C/N foi na profundidade de 30-50 cm na VNP (18). Quando comparadas as profundidades em cada tratamento no BD1 e BD15 não se observaram diferenças ao longo do perfil.

Figura 27 - Relação C/N dos solos para vegetação nativa não perturbada (VNP), *blowdown* com queda em 2019 (BD1) e *blowdown* com queda em 2005 (BD15). Onde as barras de erro correspondem ao erro padrão; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; conforme teste de Tukey a ($p > 0,05$)



O fracionamento granulométrico da matéria orgânica do solo foi realizado com o intuito de nos trazer respostas relevantes relacionadas ao estado da MOS dentro do solo de estudo. No procedimento de peneiramento separa o carbono que está particulado, onde ainda se nota restos identificáveis de plantas como raízes, folhas, material mais lignificado de troncos, entre outros.

Assim, existe a possibilidade de inferir sobre o estado do carbono em sua fração mais lábil, sendo representado pela matéria orgânica particulada (MOP). Lloyd e Taylor (1994) para fornecer substrato aos microrganismos, a elevação de temperatura, associada a porosidade preenchida por água, são suficientes, gerando altas taxas de respiração do solo com conseqüente elevação do metabolismo microbiano, o aumento da taxa respiratória dos microrganismos e das raízes, em conseqüência da aceleração da decomposição da matéria orgânica, associada a propriedades físicas do solo e a emissão de CO₂ do solo no tempo e espaço (Mantovanelli et al., 2016; Silva-Olaya et al., 2013).

Na Tabela 12 observam-se os resultados conforme a fração e tratamento dentro de uma mesma profundidade; e a fração dentro do perfil no mesmo tratamento em diferentes profundidades as quais ela pertence.

Tabela 12 - Resultados obtidos para o fracionamento físico da matéria orgânica realizado para duas frações Matéria Orgânica Particulada (MOP) e Matéria Orgânica Associada ao Mineral (MOAM), sendo determinados o percentual médio de cada fração, carbono orgânico total, nitrogênio total, relação carbono e nitrogênio, e os isótopos estáveis de ^{13}C e ^{15}N

Trat.	Fração (μm)	% médio da fração no solo	COT g kg^{-1}	NT g kg^{-1}	C/N	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$
Profundidade 0-10 cm							
BD15	MOP	37,62Ca	0,08Aab	1,63Aa	19,38Aa	7,22Aa	-29,71Ba
	MOAM	62,38Aa	1,68Aa	22,22Aab	13,12Aa	7,28Ba	-28,95Cb
BG2019	MOP	31,95Ba	0,06Ab	1,28Aa	21,43Aa	5,50Aab	-29,77Ba
	MOAM	68,05Aa	1,32Ab	18,35Ab	13,86Aa	5,45Bb	-28,63Ab
CAM	MOP	34,55Ba	0,09Aa	2,01Aa	22,13Aa	4,29ABb	-29,07Aa
	MOAM	65,45Aa	1,71Aa	24,08Aa	14,05Ba	5,72Ab	-27,95Ba
Profundidade 10-20 cm							
BD15	MOP	45,96CBa	0,05ABab	1,05ABab	20,73Aa	7,34Aa	-28,68Ba
	MOAM	54,04ABa	1,37ABab	17,09Aab	12,44Ab	7,75Ba	-28,46Ca
BG2019	MOP	41,20Ba	0,04Ab	0,73Ab	18,44Aa	7,13Aa	-28,55Aa
	MOAM	58,80Aa	1,06ABb	14,39ABb	13,70Ab	6,00ABb	-28,35Aa
CAM	MOP	46,96Aa	0,07ABa	1,62ABa	21,52Aa	4,58ABb	-29,04Aa
	MOAM	53,04Ba	1,42ABa	22,26Aa	15,63Aa	5,73Ab	-28,03Ba
Profundidade 20-30 cm							
BD15	MOP	49,28Bab	0,05ABab	0,95ABab	18,47ABa	7,51Aa	-29,33Bb
	MOAM	50,72Bab	1,27Ba	16,82Aab	13,23Ac	7,62ABa	-27,57Ba
BG2019	MOP	42,09Bb	0,04Ab	0,63Ab	16,85Aa	7,31Aa	-28,23Aa
	MOAM	57,91Aa	1,02ABa	14,76ABb	14,57Ab	6,04ABb	-27,63Ba
CAM	MOP	52,62Aa	0,07Aba	1,57ABa	21,19Aa	3,71Bb	-28,31Aab
	MOAM	47,38Bb	1,23BCa	20,95ABa	16,96Aa	5,84Ab	-27,03Aa
Profundidade 30-50 cm							
BD15	MOP	61,53Aa	0,03Ba	0,38Ba	12,94Bb	5,91Aa	-27,10Aa
	MOAM	38,47Ca	0,80Ca	10,15Bb	12,60Ac	8,35Aa	-26,82Aa
BG2019	MOP	55,00Aa	0,04Aa	0,79Aa	19,18Aa	5,60Aa	-28,89ABb
	MOAM	44,99Ba	0,76Ba	10,68Bab	13,94Ab	6,54Ab	-27,65Bb
CAM	MOP	56,27Aa	0,05Ba	1,00Ba	20,68Aa	6,00Aa	-28,33Ab
	MOAM	43,73Ba	0,96Ca	15,81Ba	16,64Aa	5,98Ab	-27,25Aab

Comparações realizadas dentro da mesma fração. ^{NS} indica que não houve significância conforme a análise de variância $p > 0,05$. Letras maiúsculas comparação entre diferentes profundidades dentro do mesmo tratamento; letras minúsculas comparação entre diferentes tratamentos na mesma profundidade, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

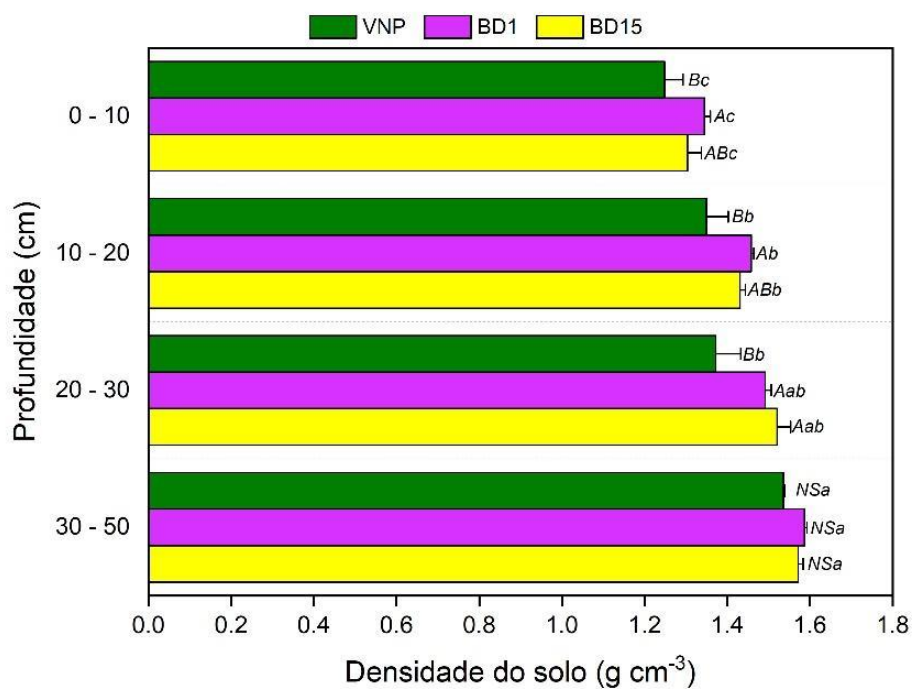
3.3.3. Atributos físicos do solo

O comportamento da variável no perfil do solo, na Figura 28 de cada área, de modo geral as camadas superiores (0.00 - 0.10) nos três tratamentos apresentaram os menores valores quando comparadas (1,24 , 1,30 e 1,34 g cm⁻³ para VNP, BD1 e BD15 respectivamente) sendo as camadas mais profundas, com maiores valores (1,53 , 1,58 e 1,57 g cm⁻³ para VNP, BD1 e BD15, respectivamente).

Na Figura 28 a comparação entre os tratamentos em cada profundidade as camadas 0-10, 10-20 e 20-30 a VNP com uma média estatisticamente menor quando comparadas aos demais tratamentos, sendo menor do que a maior média 7, 8 e 10 % respectivamente.

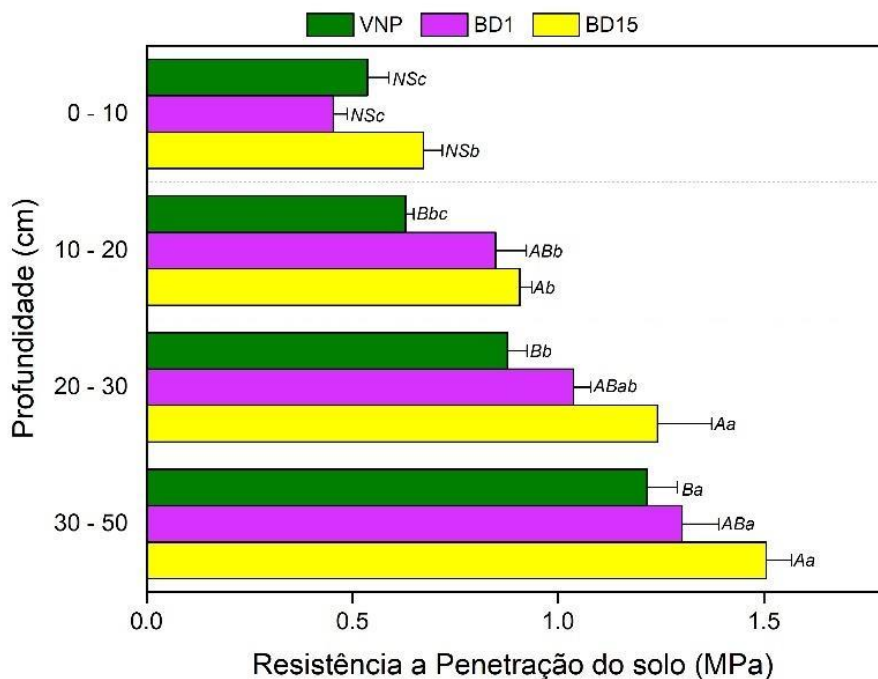
Os valores médios encontrados para a densidade do solo (Figura 28) não ultrapassaram o limite crítico para solos arenosos 1,60 g cm⁻³, demonstrados por Araujo, Tormena e Silva (2004) e Reynolds et al. (2002). Geralmente em situações em que se constata valores maiores que estes limites na densidade do solo, uma série de problemáticas surgem como por exemplo: i) dificuldade para trocas gasosas ii) aeração do solo reduzida iii) baixa capacidade hidráulica e iv) resistência ao crescimento das raízes das plantas (Frozzi et al., 2020).

Figura 28 - Densidade do solo determinada para as áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), *blowdown* com queda em 2019 (BD1) e *blowdown* com queda em 2005 (BD15). Onde as barras de erro correspondem ao desvio padrão; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; conforme teste de Tukey a 0,05% de probabilidade



Na Figura 29 a variável resistência a penetração do solo pode ser observada, os tratamentos nas diferentes profundidades são encontrados diferenças nas 10-20, 20-30 e 30-50. A resistência a penetração do solo é considerada um atributo sensível para determinação da qualidade dos solos (Rinot et al., 2019). Os valores médios encontrados neste estudo não ultrapassaram 1,5 MPa; de modo que estão abaixo do limite estabelecido como crítico para o desenvolvimento radicular da maioria das espécies estudadas, que equivale a 2,0 MPa (Masle; Farquhar, 1988; Silva; Rosolem, 2001).

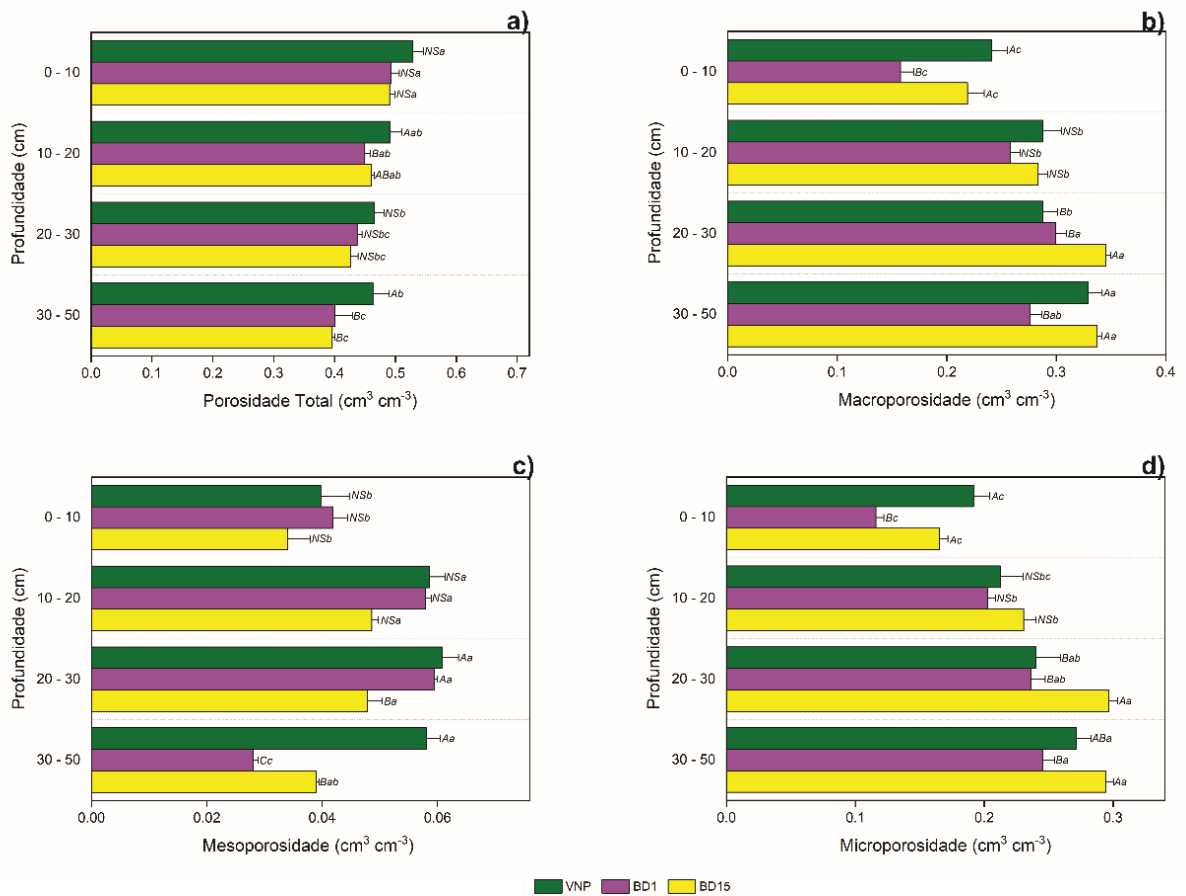
Figura 29 - Resistência a penetração do solo determinada para as áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), *blowdown* com queda em 2019 (BD1) e *blowdown* com queda em 2005 (BD15). Onde as barras de erro correspondem ao desvio padrão; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; conforme teste de Tukey a 0,05% de probabilidade



A porosidade total do solo comparando-se os tratamentos em cada profundidade apresentou diferenças estatísticas apenas nas camadas de 0-10 e 30-50, sendo a VNP a possuir os maiores valores de porosidade 0,4908 e 0,4628 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente (Figura 17a).

Considerando o perfil dos solos, na Figura 30a, cada tratamento estudado observa-se que as áreas de *blowdown* possuem o mesmo comportamento quanto a quantidade total de poros em cada camada, se estratificando ao longo do perfil, em três grupos de volumes de poros. Em ambos os tratamentos, à medida que se aproxima da superfície do solo, maiores são os valores de porosidade total quando comparados com as diferentes profundidades dentro do perfil.

Figura 30 - Representando o espaço poroso do solo foram trabalhadas as seguintes variáveis a) porosidade total do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), b) macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), c) mesoporosidade e d) microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) para as áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), *blowdown* com queda em 2019 (BD1) e *blowdown* com queda em 2005 (BD15). Onde as barras de erro correspondem ao desvio padrão; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; conforme teste de Tukey a 0,05% de probabilidade



Os tratamentos VNP e BD15 apresentaram maiores valores de macroporosidade na camada de 0-10 cm respectivamente 0,24 e 0,21 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Figura 30b). Ao longo de cada perfil ambos os tratamentos apresentaram aos menores valores de macroporosidade na camada superficial, quando comparados a demais camadas (0,21; 0,15 e 0,24 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para BD15, BD1 e VNP respectivamente).

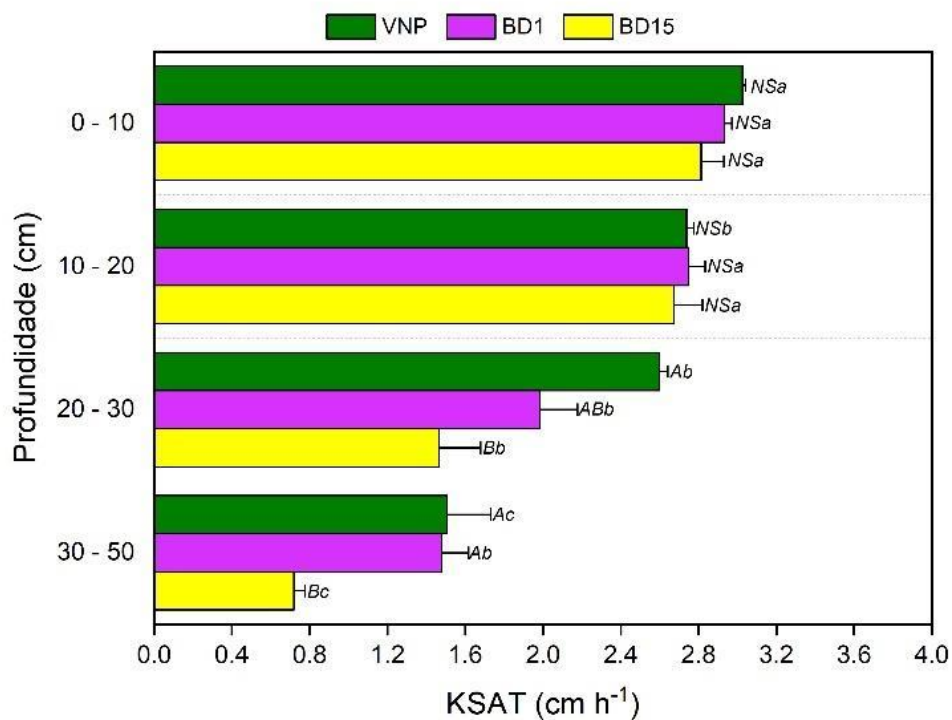
Para um desenvolvimento adequado das raízes nos solos, a macroporosidade deve corresponder a 33 % da porosidade total (Silva et al., 2008), o autor ainda observa que valores menores estão ligados diretamente a compactação do solo. A macroporosidade geralmente é preenchida por ar, ela quem garante altas taxa de condutividade (conectividade entre poros). Os valores estão assumira faixas que estão dentro da conformidade para solos arenosos. No caso da aeração o processo difusivo é o mais importante, em termos de gases, assim quanto mais macroporos maior a facilidade de passagem das moléculas de gases e sua troca por gradiente, saindo perfil do solo em direção a atmosfera.

Na Figura 30c a mesoporosidade quando comparados os tratamentos nas diferentes profundidades apresentaram diferenças significativas nas profundidades de 20-30 e 30-50 cm, onde a VNP foi superior aos demais. No tratamento VNP a camada superficial 0-10 cm ($0,0397 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) diferiu estatisticamente das demais chegando a ser 65 % menor do que na camada com maior valor 20-30 cm onde os valores chegaram a $0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Similar ao comportamento da macroporosidade a microporosidade ao longo do perfil de cada tratamento apresentou os menores valores na camada superficial (0-10 cm) nos três tratamentos (Figura 30d). No entanto, ao compararmos os tratamentos na mesma profundidade as áreas VNP e BD15 não diferiram estatisticamente, já a área de BD1 ($0,19$, $0,11$ e $0,16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para VNP, BD15 e BD1 respectivamente). Os valores estão compatíveis com a textura de solos arenosos; microporos geralmente são microsítios de ação de microrganismos possuem taxas de deslocamento de água e gases em taxas menores quando comparados com macroporos. As áreas de estudo apresentaram solo com baixa quantidade de microporos, onde facilita-se o processo de condução de água e gases no perfil, o que favorece a oxidação da MOS, reduzindo a possibilidade de encharcamentos e retenção de água por longos períodos o que pode acarretar oxidação incompleta da MOS.

Na literatura são estabelecidas relações dentro da porção porosa do solo onde o adequado seriam 33 % macroporos e 66 % microporos (Kiehl, 1979). Dadas as condições características de granulometria do solo que apresentou textura arenosa, das áreas de estudo, esta proporção chega na primeira camada (0-10 cm) 48, 35 e 49 % para macroporosidade nos tratamentos BD15, BD1 e VNP.

Figura 31 - Condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) para as áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), *blowdown* com queda em 2019 (BD1) e *blowdown* com queda em 2005 (BD15). Onde as barras de erro correspondem ao desvio padrão; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; conforme teste de Tukey a 0,05% de probabilidade

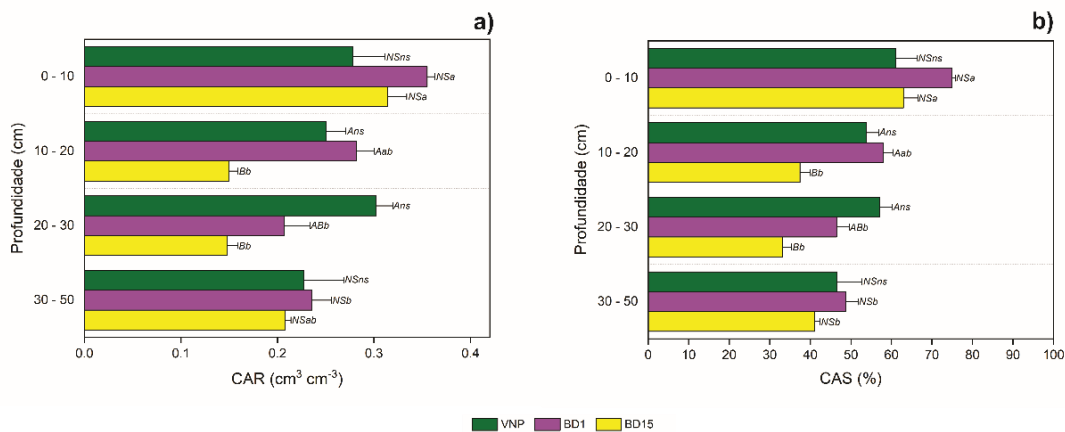


A condutividade hidráulica saturada determina a velocidade de passagem de uma determinada lâmina de água dentro do perfil do solo (Brady; Weil, 2017; Shukla, 2013). Na Figura 31, nota-se a redução da passagem da lâmina em profundidade, faz com que a velocidade de passagem da água no perfil tenha sua velocidade reduzida garantindo por mais tempo a possibilidade de uso do recurso nas camadas arenosas superficiais. Com água permanecendo por mais tempo dentro do perfil do solo ocorrem ativação de microrganismos e a ativação do seu metabolismo. Os sistemas radiculares das plantas tornam-se mais efetivos, trazendo a possibilidade de maiores emissões de CO₂. De acordo com Smith e Browning (1946) os resultados médios obtidos podem ser classificados como “muito rápido”, caracterizado por uma má retenção de água e drenagem excessiva. O excesso de drenagem pode ocasionar uma série de prejuízos ao meio, podemos listar a

lixiviação de nutrientes, sabendo-se que solos tropicais são pobres em nutrientes, dependendo basicamente dos ciclos biogeoquímicos para manutenção da biodiversidade.

A atmosfera do solo é de vital importância para o adequado desenvolvimento das raízes de plantas e microrganismos (Brady; Weil, 2017). Os diferentes tratamentos quando comparado apresentam diferenças significativas nas profundidades de 10-20 e 20-30 m, onde o BD1 e a VNP apresentaram os maiores valores na camada 10-20 cm seguidos do BD15 (0,28, 0,25 e 0,14 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ respectivamente) (Figura 32a). Já na camada 20-30 m a VNP obteve o maior valor médio (0,30 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) (Figura 32a). A capacidade de ar do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e a capacidade de aeração do solo (%) expressam valores médios característicos de solos arenosos, conforme Reynolds et al. (2002).

Figura 32 - CAR - Capacidade de ar do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e CAS - Capacidade de aeração do solo (%) para as áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), *blowdown* com queda em 2019 (BD1) e *blowdown* com queda em 2005 (BD15). Onde as barras de erro correspondem ao desvio padrão; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; conforme teste de Tukey a 0,05% de probabilidade



Reynolds et al. (2002) em seu trabalho encontraram característica de arejamento consideradas dentro das faixas, apenas nas áreas de solos arenosos, com valores entre 0,10 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ como limite crítico para aeração dos solos. As variáveis relacionadas a água e atividade de plantas avaliadas neste estudo foram capacidade de campo (Tabela 13), ponto de murcha permanente (Tabela 14) e água disponível (Figura 1). Conforme Cassel e Nielsen (2018) a quantidade de

água retida pelo solo, que permanece o transformando em um reservatório de água, é denominada capacidade de campo; a quantidade de água retida, mas não acessível às plantas é o ponto de murcha permanente.

Tabela 13 - Resultados obtidos para capacidade de campo ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), seguidas do desvio padrão, para as áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), *blowdown* com queda em 2019 (BD1) e *blowdown* com queda em 2005 (BD15)

Tratamento	Capacidade de Campo ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)			
	Profundidade 0 - 10 cm			
BD15	0,13895	±	0,02839	Ans
BD1	0,08672	±	0,00456	Bc
VNP	0,13232	±	0,01846	ABns
Profundidade 10 - 20 cm				
BD15	0,13044	±	0,00419	NSns
BD1	0,10921	±	0,01706	NSb
VNP	0,12174	±	0,00549	NSns
Profundidade 20 - 30 cm				
BD15	0,13425	±	0,01354	NSns
BD1	0,11845	±	0,0054	NSb
VNP	0,11959	±	0,0429	NSns
Profundidade 30 - 50 cm				
BD15	0,11324	±	0,00768	NSns
BD1	0,13926	±	0,03833	NSa
VNP	0,13987	±	0,04282	NSns

NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; Letras minúsculas comparação entre diferentes profundidades dentro do mesmo tratamento; letras maiúsculas comparação entre diferentes tratamentos na mesma profundidade, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A capacidade de campo das áreas de estudo apresentou diferença significativa entre os tratamentos na primeira camada (0-10 cm), onde as maiores capacidades de campo se manifestaram no BD15 e VNP, sendo menor estatisticamente no BD1. O comportamento da variável diferiu ao longo perfil do solo apenas no BD1.

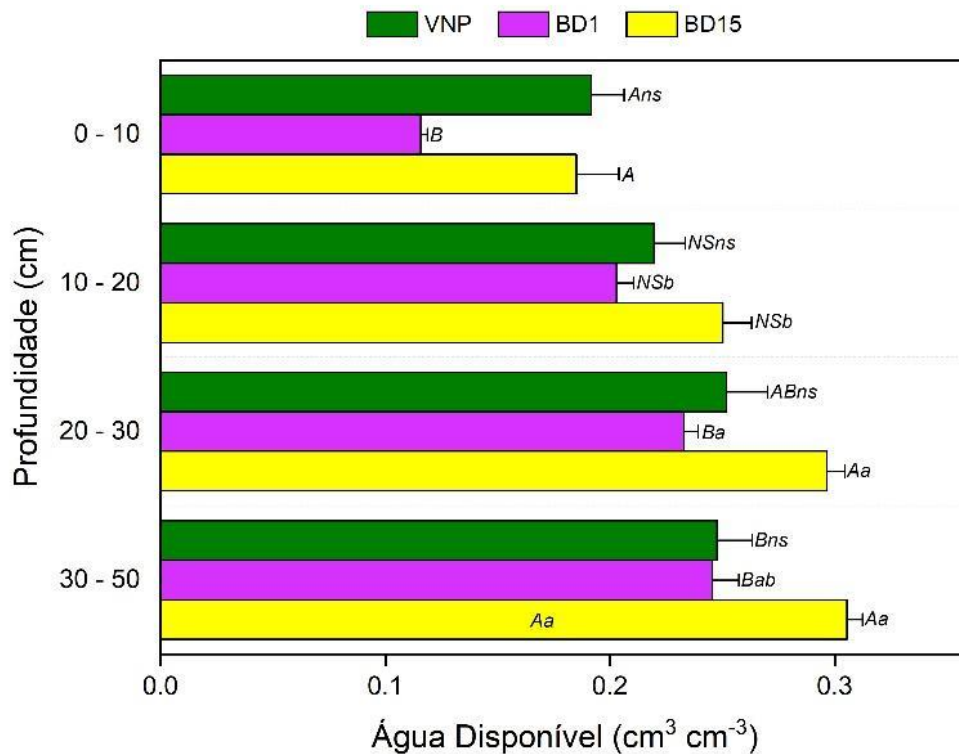
Tabela 14 - Resultados obtidos para ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), seguidas do desvio padrão, para as áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), *blowdown* com queda em 2019 (BD1) e *blowdown* com queda em 2005 (BD15)

Tratamento	PMP ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)			
Profundidade 0 - 10 cm				
BD15	0,04599	±	0,0148	NSc
BD1	0,02685	±	0,00113	NSb
VNP	0,06001	±	0,01873	NSb
Profundidade 10 - 20 cm				
BD15	0,12175	±	0,02739	NSb
BD1	0,09369	±	0,01778	NSa
VNP	0,10347	±	0,01484	NSa
Profundidade 20 - 30 cm				
BD15	0,1638	±	0,01361	Aab
BD15	0,12692	±	0,00592	Aa
VNP	0,11057	±	0,01186	Ba
Profundidade 30 - 50 cm				
BD15	0,19043	±	0,01344	Aa
BD1	0,12944	±	0,01418	Ba
VNP	0,14173	±	0,03576	Ba

NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; Letras minúsculas comparação entre diferentes profundidades dentro do mesmo tratamento; letras maiúsculas comparação entre diferentes tratamentos na mesma profundidade, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A capacidade de água disponível é a diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, compreendida como a quantidade de água retida por um solo disponível para uso das plantas (Cassel; Nielsen, 2018). Os valores médios, encontrados neste estudo, são considerados baixos (Figura 33).

Figura 33 - Capacidade de água disponível do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) para as áreas de estudo vegetação nativa não perturbada (VNP), *blowdown* com queda em 2019 (BD1) e *blowdown* com queda em 2005 (BD15). Onde as barras de erro correspondem ao desvio padrão; NS - Indica que as medias não diferem estatisticamente entre tratamentos na mesma profundidade; ns - indica que as medias não diferem estatisticamente no dentro no mesmo tratamento em diferentes profundidades; letras maiúsculas comparação entre tratamentos na mesma profundidade, letras minúsculas comparação entre profundidade no mesmo tratamento; conforme teste de Tukey a 0,05% de probabilidade



A granulometria do solo afeta a umidade do solo. Solos com poros maiores, devido a textura arenosa, retêm uma quantidade menor de água, garantindo condições a emissão de gases em condições aeróbicas (Van Der Weerden; Kelliher; De Klein, 2012), como por exemplo o NO e CO_2 . Entretanto, em solos com predominância de microporos, a proximidade dos agregados reduz a difusão do ar no perfil do solo, promovendo a formação de CH_4 e N_2O sob condições anaeróbicas (Gu et al., 2013; Ussiri; Lal, 2013) e conseqüentemente, geram o acúmulo de CO_2 no perfil do solo, pois a sua saída por difusão fica impossibilitada.

A compactação dos solos também contribui similarmente, devido à ausência de continuidade porosa do perfil solo (Bicalho et al., 2017; Van Horn et al., 1995).

Borges et al. (2015) notaram que solos com aporte de carbono, emissões mais elevadas de CO₂ foram encontradas em áreas com textura argilosa, se comparados com solos de textura arenosa em condições tropicais, similarmente às condições temperadas (Dilustro et al., 2005).

Apesar das três áreas de estudo pertencerem a áreas não perturbadas diretamente pelas ações antropogênicas. Podemos observar a superioridade da VNP em relação a vários atributos, onde a ausência de queda da floresta mantém o equilíbrio dentro do perfil do solo mantendo as relações entre microrganismos, sistema radicular, consideradas constantes, para o curto espaço de tempo no qual foram realizadas as avaliações. Essa constatação é relatada por diversos autores que ao contrastarem áreas de cultivo com vegetação nativa tomando-a por referência para muitos atributos, estes intimamente ligados a MOS (Bermeo et al., 2022; Enck et al., 2022; Soares et al., 2022; Souza et al., 2023).

3.4. Conclusão

Conclui-se que:

i) as condições de floresta não perturbada garantem o equilíbrio mantendo seus ciclos biogeoquímicos do C e N, estes por sua vez, asseguram a existência da biodiversidade da floresta nas condições de solos arenosos. Trazendo assim a floresta na sua condição natural (não perturbada) como a detentora da maior estabilidade na residência de carbono e nitrogênio no solo;

ii) a matéria orgânica do solo é grande moduladora das condições físicas do solo, se apresentando como indicador fundamental de equilíbrio; ela interfere diretamente nas relações de água e ar no solo em condições florestais;

iii) após 15 anos de derrubada a floresta não retornou à condição inicial do solo, identificada pelo estoque de carbono no perfil do solo; onde a tendência é de mineralização rápida em situações de queda e constância de aporte de material em situações de floresta não perturbada.

Referências

ARAGÃO, L. E. O. C. et al. Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. **Biological Reviews**, v. 89, n. 4, p. 913–931, nov. 2014. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/brv.12088>>.

ARAUJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 337–345, abr. 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832004000200012&lng=pt&tlng=pt>.

ARAUJO, R. F. et al. Regional distribution of large blowdown patches across Amazonia in 2005 caused by a single convective squall line. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 15, p. 7793–7798, 16 ago. 2017. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/2017GL073564>>.

BERMEO, J. P. C. et al. Evaluating soil quality in silvopastoral systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Colombian Amazon. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 53, 2022. Disponível em: <<http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/issue/view/81>>.

BICALHO, E. da S. et al. Soil Greenhouse Gases: Relations to Soil Attributes in a Sugarcane Production Area. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 5, p. 1168–1178, set. 2017. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj2017.02.0043>>.

BORDON, N. G. et al. Blowdown disturbance effect on the density, richness and species composition of the seed bank in Central Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 453, n. September, p. 117633, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117633>>.

BORGES, C. S. et al. Agregação do solo, carbono orgânico e emissão de CO₂ em áreas sob diferentes usos no Cerrado, região do Triângulo Mineiro. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 10, n. 3, 3 jul. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1980-993X2015000300660&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The Nature and Properties of Soils**. 15th editi ed. [s.l.] Pearson, 2017.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777–783, maio 1992. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>>.

CASSEL, D. K.; NIELSEN, D. R. Field Capacity and Available Water Capacity. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. Madison: ASA, 1986. p. 901–926.

CASTANHO, A. D. A. et al. Changing Amazon biomass and the role of atmospheric CO₂ concentration, climate, and land use. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 30, n. 1, p. 18–39, jan. 2016. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/2015GB005135>>.

CHAPUIS-LARDY, L. et al. Soils, a sink for N₂O? A review. **Global Change Biology**, v. 13, n. 1, p. 1–17, jan. 2007. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/gcb.12239>>.

CUNHA, H. F. V. et al. Direct evidence for phosphorus limitation on Amazon forest productivity. **Nature**, v. 608, n. 7923, p. 558–562, 18 ago. 2022. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41586-022-05085-2>>.

DAVIDSON, E. A. et al. Testing a Conceptual Model of Soil Emissions of Nitrous and Nitric Oxides Using two functions based on soil nitrogen availability and soil water content, the hole-in-the-pipe model characterizes a large fraction of the observed variation of nitric oxide and nitrous oxide emissions from soils. **BioScience**, v. 50, n. 8, p. 667–680, 1 ago. 2000.

DAVIDSON, E. A. et al. Effects of an experimental drought and recovery on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest. **Global Change Biology**, v. 14, n. 11, p. 2582–2590, set. 2008. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2486.2008.01694.x>>.

DILUSTRO, J. J. et al. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests. **Forest Ecology and Management**, v. 204, n. 1, p. 87–97, jan. 2005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112704006498>>.

DONAGEMA, G. K. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 2011.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 529–538, 1995.

ENCK, B. F. et al. Forest–Fruticulture Conversion Alters Soil Traits and Soil Organic Matter Compartments. **Plants**, v. 11, n. 21, p. 2917, 29 out. 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2223-7747/11/21/2917>>.

ESPÍRITO-SANTO, F. D. B. et al. Size and frequency of natural forest disturbances and the Amazon forest carbon balance. **Nature Communications**, v. 5, n. 1, p. 3434, 18 maio 2014. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/ncomms4434>>.

FARQUHAR, G. D.; EHLERINGER, J. R.; HUBICK, K. T. Carbon Isotope Discrimination and Photosynthesis. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 40, n. 1, p. 503–537, jun. 1989. Disponível em: <<https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.pp.40.060189.002443>>.

FELDPAUSCH, T. R. et al. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. **Biogeosciences**, v. 9, n. 8, p. 3381–3403, 27 ago. 2012. Disponível em: <<https://www.biogeosciences.net/9/3381/2012/>>.

FROZZI, J. C. et al. Physical attributes and organic carbon in soils under natural and anthropogenic environments in the South Amazon region. **Environmental Earth Sciences**, v. 79, n. 11, p. 251, 21 jun. 2020. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s12665-020-08948-x>>.

FURTADO NETO, A. T. et al. Produção e Fluxo de Metano na Floresta Nacional do Tapajós. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 4, p. 585–596, dez. 2019. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862019000400585&tlng=pt>.

GAO, B. et al. Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: A two-year field study. **Science of the Total Environment**, 2014.

GU, J. et al. A regional experiment suggests that soil texture is a major control of N₂O emissions from tile-drained winter wheat fields during the fertilization period. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 60, p. 134–141, maio 2013. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038071713000400>>.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro, 2012.

INPE. **Estimativa de desmatamento na Amazônia Legal para 2022 é de 11.568 km². 2022.** Available at: https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/sei_01340-009084_2022_72_notatecnica_estimativa_prodes_2022_revisada_lu_lm_27_10_rev_la-002.pdf.

KELLER, M. et al. Soil–Atmosphere Exchange of Nitrous Oxide, Nitric Oxide, Methane, and Carbon Dioxide in Logged and Undisturbed Forest in the Tapajós National Forest, Brazil. **Earth Interactions**, v. 9, n. 23, p. 1–28, nov. 2005.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relação solo planta**. [s.l.] Agronômica Ceres, 1979.

KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. **Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling**, v. 9, p. 210–221, 1965.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. **Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods**, v. 5, p. 635–662, 1986.

LEWIS, S. L. et al. The 2010 Amazon Drought. **Science**, v. 331, n. 6017, p. 554–554, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1200807>>.

LLOYD, J.; TAYLOR, J. A. On the Temperature Dependence of Soil Respiration. **Functional Ecology**, v. 8, n. 3, p. 315, jun. 1994. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/2389824?origin=crossref>>.

MANTOVANELLI, B. C. et al. Distribuição espacial da emissão de CO₂ e atributos do solo sob campo nativo na região de Humaitá, Amazonas. **Sociedade & Natureza**, v. 28, n. 2, p. 273–284, ago. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-45132016000200273&lng=pt&tlng=pt>.

MASLE, J.; FARQUHAR, G. D. Effects of Soil Strength on the Relation of Water-Use Efficiency and Growth to Carbon Isotope Discrimination in Wheat Seedlings. **Plant Physiology**, v. 86, n. 1, p. 32–38, 1 jan. 1988. Disponível em: <<https://academic.oup.com/plphys/article/86/1/32-38/6082986>>.

MIÉRCIO, J. A. F. J. et al. Assessing the impact of different tillage systems and land uses on CO₂-C emissions in Eastern Amazonia. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 30, p. 2427–2441, 27 jul. 2017. Disponível em: <<http://academicjournals.org/journal/AJAR/article-abstract/74F61A865334>>.

MOORE, J. R. et al. Validation of demographic equilibrium theory against tree-size distributions and biomass density in Amazonia. **Biogeosciences**, v. 17, n. 4, p. 1013–1032, 26 fev. 2020. Disponível em: <<https://www.biogeosciences.net/17/1013/2020/>>.

NEGRÓN-JUÁREZ, R. I. et al. Widespread Amazon forest tree mortality from a single cross-basin squall line event. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 16, p. n/a-n/a, ago. 2010. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2010GL043733>>.

NEGRÓN-JUÁREZ, R. I. et al. Windthrow variability in central Amazonia. **Atmosphere**, v. 8, n. 2, p. 1–17, 2017.

OERTEL, C. et al. Greenhouse gas emissions from soils—A review. **Geochemistry**, v. 76, n. 3, p. 327–352, out. 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009281916300551>>.

PAN, Y. et al. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. **Science**, v. 333, n. 6045, p. 988–993, 19 ago. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1201609>>.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 11, 1633-1644 p. 2007.

PHILLIPS, O. L. et al. Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. **Science**, v. 323, n. 5919, p. 1344–1347, 6 mar. 2009. Disponível em: <<https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1164033>>.

REYNOLDS, W. . et al. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v. 110, n. 1–2, p. 131–146, nov. 2002. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706102002288>>.

RINOT, O. et al. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. **Science of the Total Environment**, 2019.

SANTOS, L. T. et al. Windthrows increase soil carbon stocks in a central Amazon forest. **Biogeosciences**, v. 13, n. 4, p. 1299–1308, 2 mar. 2016. Disponível em: <<https://bg.copernicus.org/articles/13/1299/2016/>>.

SATYAMURTY, P.; DA COSTA, C. P. W.; MANZI, A. O. Moisture source for the Amazon Basin: a study of contrasting years. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 111, n. 1–2, p. 195–209, 1 jan. 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00704-012-0637-7>>.

SHUKLA, M. K. **Soil physics: An introduction**. Boca Raton: CRC Press, 2013.

SILVA-OLAYA, A. M. et al. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 1, p. 015014, 1 mar. 2013. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1748-9326/8/i=1/a=015014?key=crossref.d7b1480871514a323c17d330781ffd25>>.

SILVA, A. R.; LIMA, R. P. **Cran.R. Package ‘soilphysics’**. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/soilphysics/soilphysics.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2023.

SILVA, G. J. et al. Variação de atributos físico-hídricos em latossolo vermelho-amarelo do Cerrado mato-grossense sob diferentes formas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 2135–2143, out. 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832008000500034&lng=pt&tlng=pt>.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 253–260, jun. 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832001000200001&lng=pt&tlng=pt>.

SMITH, R. M.; BROWNING, D. R. INFLUENCE OF EVACUATION UPON LABORATORY PERCOLATION RATES AND WETTING OF UNDISTURBED SOIL SAMPLES. **Soil Science**, v. 62, n. 3, 1946. Disponível em: <https://journals.lww.com/soilsci/Fulltext/1946/09000/INFLUENCE_OF_EVACUATION_UPON_LABORATORY.4.aspx>.

SOARES, M. D. R. et al. Physical Quality and Porosity Aspects of Amazon Anthropogenic Soils under Different Management Systems. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2022, p. 1–9, 13 abr. 2022. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/aess/2022/6132322/>>.

SOUZA, M. et al. Indicator attributes of soil quality in areas under different land use systems, in the Western Amazon. **Floresta**, v. 53, n. 1, p. 1-9, 2023. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/72158>>. Acesso em: 24 jan. 2023.

SULLIVAN, M. J. P. et al. Long-term thermal sensitivity of Earth's tropical forests. **Science**, v. 368, n. 6493, p. 869–874, 22 maio 2020. Disponível em: <<https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.aaw7578>>.

USSIRI, D.; LAL, R. **Soil Emission of Nitrous Oxide and its Mitigation**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013.

VAN DER WEERDEN, T. J.; KELLIHER, F. M.; DE KLEIN, C. A. M. Influence of pore size distribution and soil water content on nitrous oxide emissions. **Soil Research**, v. 50, n. 2, p. 125, 2012. Disponível em: <<http://www.publish.csiro.au/?paper=SR11112>>.

VAN HORN, H. H. et al. Components of Dairy Manure Management Systems. **Journal of Dairy Science**, v. 77, n. 7, p. 2008–2030, jul. 1994. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022030294771472>>.

WHITMAN, W. B.; BOWEN, T. L.; BOONE, D. R. The Methanogenic Bacteria. In: **The Prokaryotes**. New York, NY: Springer New York, 2006. p. 165–207.

WICK, B. et al. Nitrous oxide fluxes and nitrogen cycling along a pasture chronosequence in central Amazonia, Brazil. **Biogeosciences**, v. 2, p. 175 – 187, 2005.

WIGNERON, J.-P. et al. Tropical forests did not recover from the strong 2015–2016 El Niño event. **Science Advances**, v. 6, n. 6, p. eaay4603, 5 fev. 2020. Disponível em: <<https://advances.sciencemag.org/content/6/6/eaay4603>>.