

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

EDILSON AMARAL TAVARES COUTINHO

**VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO PARA DIAGNÓSTICO
DA QUALIDADE ESTRUTURAL EM SOLOS CULTIVADOS COM
CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DO MÉTODO DE COLHEITA**

RECIFE-PE

FEVEREIRO, 2023

Edilson Amaral Tavares Coutinho

Geógrafo

**Volume elementar representativo para diagnóstico da qualidade estrutural em solos
cultivados com cana-de-açúcar em função do método de colheita**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

Coorientadores:

Prof. Dr. Fernando José Freire

Dr. Douglas Monteiro Cavalcante

**Recife-PE
Fevereiro, 2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C871v Coutinho, Edilson
VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO PARA AFERIÇÃO DA QUALIDADE ESTRUTURAL EM SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DO MÉTODO DE COLHEITA / Edilson Coutinho. - 2023.
64 f. : il.
- Orientador: Brivaldo Gomes de Almeida.
Coorientador: Douglas Monteiro Cavalcante.
Inclui referências.
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, 2023.
1. Mecanização. 2. Queimada. 3. Resistência tênsil. 4. Índices de estabilidade de agregados. I. Almeida, Brivaldo Gomes de, orient. II. Cavalcante, Douglas Monteiro, coorient. III. Título

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

EDILSON AMARAL TAVARES COUTINHO

**Volume elementar representativo para diagnóstico da qualidade estrutural em solos
cultivados com cana-de-açúcar em função do método de colheita**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 28 de fevereiro de 2023

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

Orientador

Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ademir de Oliveira Ferreira

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota

Universidade Federal do Ceará

AGRADECIMENTOS

À minha família, principalmente mais pais, Claudia Amaral e Erivaldo Tavares, pelo primeiro parente na família com grau de mestre; espero retribuir toda confiança que vocês têm em mim.

Aos meus avós que não estão mais presentes, mas com certeza merecem ser agradecidos por esse momento.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida, pelos conselhos, dedicação e paciência. A ele desejo toda virtude e sabedoria que ele sempre me desejou durante esses anos.

Aos meus coorientadores Dr. Douglas Monteiro Cavalcante e Prof. Dr. Fernando José Freire, por todo auxílio e conhecimento compartilhado.

Aos membros da banca avaliadora, Prof. Dr. Ademir de Oliveira Ferreira e Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, pelas suas importantes contribuições ao documento final.

À minha noiva, Stephany de Moura Santos, por toda sua paciência e compreensão em meio a tantas complicações no decorrer da pós-graduação e que sempre esteve presente me dando ouvidos e conselhos.

Aos amigos e companheiros para além do mestrado: Eudes, Danillo, Rafael, Talmo, Vitória, Rayanna, Pedro e Arnaldo, que estiveram por perto, e contribuíram cada um do seu jeito, seja por seus auxílios em disciplinas ou durante os desdobramentos da pesquisa.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo, pelo espaço e estrutura para realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Volume elementar representativo para diagnóstico da qualidade estrutural em solos cultivados com cana-de-açúcar em função do método de colheita.

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma das mais relevantes culturas do Brasil, principalmente pela sua grande importância econômica. A agroindústria canavieira brasileira, com produção estimada em 596,1 milhões de toneladas na safra de 2022/2023, é um importante exportador de açúcar e de álcool a nível global. Para melhorar a rentabilidade do setor, driblar a escassez de mão-de-obra e cumprir a legislação ambiental, no processo de produção, a colheita mecanizada total ou parcial em relação ao método tradicional, com queima prévia do canavial, tem se apresentado como melhor opção, do ponto de vista econômico e de qualidade ambiental. A partir dos atributos físicos do solo é possível mensurar sua qualidade, quando das modificações por diferentes sistemas agrícolas, podendo orientar estratégias de manejo e manutenção da qualidade física do solo, evitando sua degradação. O objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade física estrutural do solo em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar, com sistemas de colheita mecanizada (cana crua) e queima prévia do canavial. As amostras dos solos destinadas aos ensaios físicos foram coletadas nas formas com estrutura preservada (agregados e cilindro volumétrico) e não preservada (trado/pá: terra fina seca ao ar – TFSA). As amostras em agregados foram utilizadas para determinação da resistência tênsil (RT) de agregados do solo, via penetrômetro de bancada; bem como para os ensaios dos índices de estabilidade de agregados - IEA (diâmetro médio ponderado - DMP, diâmetro médio geométrico - DMG, índice geral de estabilidade de agregados - IGEA e AGRI), via úmida, por meio do aparelho de Yoder. Amostras em cilindro volumétrico ($\cong 100 \text{ cm}^3$) foram usadas nos ensaios de porosidade total (método de saturação), distribuição de tamanho de poros (macro e microporos, via mesa de tensão) e densidade do solo (método cilindro volumétrico); enquanto as em TFSA foram destinadas às determinações da granulometria e do carbono orgânico dos solos. Os agregados foram separados em dois grupos de tamanho, sendo: o primeiro, com diâmetro equivalente medindo 22 e 44 mm, utilizados nos ensaios de RT; e o segundo, com 5,32; 11,5 e 17,6 mm, para os IEA. Os resultados da RT e dos IEA foram usados também para a determinação do volume elementar representativo (VER), definido como o tamanho da amostra (agregado), a partir do qual, o aumento do seu volume não interfere nos resultados do atributo analisado. Assim, essa pesquisa constatou que a colheita sob queima promoveu alterações na estrutura no solo, mesmo numa escala de tempo curta. Os resultados sugerem que a queima da cobertura vegetal do ambiente promoveu a diminuição da matéria orgânica do solo. A área de mata nativa apresentou os melhores índices da condição estrutural dos solos, sendo seguida pela área de cana sob colheita crua. O VER indicou os tamanhos adequados para os ensaios de cada atributo, definido como $\leq 5,32$ mm para os IEA, e 22 mm para os de RT.

Palavras-chave: Mecanização. Queimada. Resistência tênsil. Índices de estabilidade de agregados.

Representative elemental volume for the diagnostic of structural quality in soils cultivated with sugarcane according to the harvesting method

ABSTRACT

Sugarcane is one of the most relevant crops in Brazil, mainly because of its great economic importance. With an estimated production of 596.1 million tons in the 2022/2023 harvest, the Brazilian sugarcane agroindustry is an important global exporter of sugar and alcohol. To improve the profitability of the sector, circumvent the labor shortage and comply with environmental legislation, in the production process, total or partial mechanized harvesting about the traditional method, with previous burning of the sugarcane plantation, has presented itself as the best option, from the economic and environmental quality point of view. From the physical attributes of the soil, it is possible to measure its quality, when modified by different agricultural systems, and to guide management strategies and maintenance of the physical quality of the soil, avoiding its degradation. The objective of this study was to evaluate the structural physical quality of the soil in areas under sugarcane cultivation, with mechanized harvesting systems (raw sugarcane) and previous burning of the sugarcane field. The soil samples for the physical tests were collected in structured (aggregates and volumetric cylinder) and unstructured (auger/shovel: fine air-dried soil - FADS) forms. Thus, the aggregate samples were used to determine the soil tensile strength (TS), via bench penetrometer; as well as for the aggregate stability index (ASI) tests, via the wet method. The aggregates for TS were moisture balanced at room temperature; while the aggregate stability parameters (weighted mean diameter, geometric mean diameter, and aggregate stability index) were determined using the Yoder apparatus. Samples in the volumetric cylinder ($\cong 100 \text{ cm}^3$) were used in the tests of total porosity (saturation method), pore size distribution (macro and micropores, via tension table), and soil density (volumetric cylinder method). In contrast, those in FADS were used for determination of particle size and organic carbon of soils. In the aggregates assays two size groups were used, each with three equivalent diameter classes (eq.), being: the first group, measuring 22 and 44 mm, used in the TS assays; and the second, with 5.32; 11.5, and 17.6 mm, for the ASI ones. Each aggregate size class was also used in the tests to determine the representative elemental volume (REV), defined for each attribute studied (TS and ASI). Thus, the delimitation of the REV was based on the size of the aggregate, from which the increase in its volume did not influence the results of the analyzed attribute. Thus, this research found that harvesting under burning promoted changes in the structure of the soil, even on a short time scale, represented by the burning of the vegetation cover in the environment and consequently reducing soil organic matter (SOM), the native forest area presented the best structural values being followed by the cane area without the burning process. The REV was kept in standard sizes (5.32 mm for the wet tests and 22 mm for the TS tests) following the standard established in the literature.

Keywords: Mechanization. Sugarcane burning. Tensile strength. Aggregate stability indices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do município de Igarassu-PE e do local de coleta dentro do município.	23
Figura 2 - Croqui demonstrando a disposição dos pontos de coleta na área experimental.	24
Figura 3 - Imagem aérea da área de estudo via drone, ilustrado o canal sob os dois tratamentos (colheita crua versus queima), tendo-se ao fundo a mata nativa.	25
Figura 4 - Vista do talhão com espaço referente à bordadura (A) e entrelinha (B).	25
Figura 5 - Visão lateral da trincheira usada para a coleta (A); remoção das amostras em blocos de solo (B); coleta das amostras em anéis volumétricos via Uhland (C).....	26
Figura 6 -Torrões utilizados no fracionamento (A); processo de tamisação em peneiras (B); conjunto de peneiras utilizadas para a obtenção dos agregados (C).....	26
Figura 7 - Agregados utilizados nos ensaios em variados tamanhos (A); os círculos em vermelho indicam as esferas de isopor utilizadas como padrões de volumes para obtenção das classes de tamanho dos agregados (B).	27
Figura 8 - Esquematização da mesa de tensão (A); amostras em anéis volumétricos em análise na mesa de tensão (B).....	29
Figura 9 - Mesa para peneiramento por via úmida, tipo Yoder.....	30
Figura 10 - Penetrômetro de bancada utilizado nos ensaios para determinação em laboratório da resistência tênsil dos agregados de solos, onde: (A) Detalhe da célula de carga, que registra a força máxima para ruptura do agregado;(B) Agregado após ruptura.....	32
Figura 11 - Análise espacial da área de cana sem queima (crua) com os 12 pontos de coleta	34
Figura 12 - Análise espacial da área de cana com queima com os 12 pontos de coleta.....	35
Figura 13 - Análise espacial da área de mata nativa com os 12 pontos de coleta	36
Figura 14 – Proporção de agregados dos solos em cada classe de tamanhos. A) 5,32 mm; B) 11,5 mm; C) 17,6 mm.....	38
Figura 15 - Proporção de agregados de solo em cada classe em função do tipo de cultivo com variados tamanhos de agregados. A) Cana crua; B) Cana sob queimada; C) Mata nativa.	38
Figura 16 – Diâmetro médio ponderado dos agregados em função do aumento de tamanho das classes.....	40
Figura 17 - Representação gráfica do diâmetro médio geométrico em relação aos diferentes tamanhos de agregados	41

Figura 18 – Bloco de solo ilustrando a grande quantidade de raízes finas e médias, responsáveis pela manutenção da estrutura do solo	42
Figura 19 – Relação entre o índice AGRI e o índice geral de estabilidade de agregados-IGEA sendo C/SQ = cana sem queima e C/Q = cana com queima	43
Figura 20 - Macroporo biológico gerado no solo por ação dos organismos vivos.	45
Figura 21 - Índice de qualidade do solo gerado por regressão não linear, utilizando os valores do AGRI e do IGEA, além da macro e mesoporosidade.	52
Figura 22 - Mapa de krigagem dos dados de qualidade do solo em função dos pontos de coleta.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diâmetro médio equivalente dos agregados (X_i) e sua respectiva classe de tamanho.	31
Tabela 2 - Atributos físicos utilizados para a caracterização do solo das áreas sob cultivo de cana-de-açúcar e mata nativa.....	36
Tabela 3 - Massa dos agregados nas diferentes classes para as profundidades avaliadas.....	37
Tabela 4 - Relação entre as médias de cada agregados em função do tipo de tratamento	39
Tabela 5 - Relação entre as médias de cada agregados em função do tipo de tratamento	40
Tabela 6 - Índice geral de estabilidade de agregados em função do tipo de manejo adotado na pesquisa	41
Tabela 7 - Índice AGRI em função do tipo de manejo adotado na pesquisa.....	42
Tabela 8 - Tabela demonstrativa da análise dos dados da RT para os agregados com diâmetro equivalente (\varnothing_{eq}) de 22 mm e 44 mm	43
Tabela 9 - Porosidade do solo (PT) e suas classes de poros em relação aos tipos de manejo utilizados no estudo	45
Tabela 10 - Atributos químicos utilizados para a caracterização das amostras das áreas em estudo, sob cultivo de cana-de-açúcar.	46
Tabela 11 - Coeficientes de correlação de Pearson para a área de cana sem queima utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 5,32$ mm (IEA) e 22 mm (RT)..	47
Tabela 12 - Coeficientes de correlação de Pearson para a área de cana sem queima utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 11,5$ mm (IEA) e 22 mm (RT)..	47
Tabela 13 - Coeficientes de correlação de Pearson para a área de cana sem queima utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 17,6$ mm (IEA) e 22 mm (RT)..	48
Tabela 14 - Coeficientes de correlação de Pearson para a área de cana com queima utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 5,32$ mm (IEA) e 22 mm (RT)..	48
Tabela 15 - Coeficientes de correlação de Pearson para a área de cana com queima utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 11,5$ mm (IEA) e 22 mm (RT)..	49
Tabela 16 - Coeficientes de correlação de Pearson para a área de cana com queima utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 17,6$ mm (IEA) e 22 mm (RT)..	49
Tabela 17 - Coeficientes de correlação de Pearson para a área de mata nativa utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 5,32$ mm (IEA) e 22 mm (RT).....	50

Tabela 18 - Coeficientes de correlação de Pearson para a área de mata nativa utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 11,5$ mm (IEA) e 22 mm (RT).	50
Tabela 19 - Coeficientes de correlação de Pearson para a área de mata nativa utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 17,6$ mm (IEA) e 22 mm (RT)	51

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Hipóteses.....	15
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo Geral	15
1.2.2 Objetivos Específicos	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Cultivo e manejo da cana-de-açúcar.....	16
2.2. A estrutura do solo.....	17
2.3. Efeito do cultivo e manejo nos atributos físicos do solo	17
2.4. Alterações da qualidade do solo devido à queima.....	18
2.5. Resistência tênsil de agregados do solo.....	19
2.6. Agregação do solo	20
2.7. Diâmetro médio ponderado, geométrico e índice geral de estabilidade do solo	21
2.8. Volume elementar representativo (VER)	22
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1. Descrição da área.....	23
3.2 Coleta das amostras de solo e pré-tratamentos para os ensaios.....	24
3.3 Atributos físicos e químicos para caracterização dos solos.....	27
3.3.1 Granulometria.....	27
3.3.2 Porosidade total (PT) e distribuição do tamanho de poros (DTP).....	28
3.3.3 Densidade do solo (Ds).....	29
3.3.4 Carbono orgânico total do solo (COT).....	29
3.4 Índices de agregação do solo	30
3.4.1 Diâmetro médio ponderado (DMP).....	31
3.4.2 Diâmetro médio geométrico (DMG)	31
3.4.3 Índice geral estabilidade dos agregados (IGEA) e índice AGRI.....	32

3.5 Resistencia tênsil de agregados de solos (RT)	32
3.6. Volume elementar representativo (VER).....	33
3.7. Análise estatística.....	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1. análise geoespacial das áreas	34
4.2 Classes texturais dos solos	36
4.3 Distribuições das classes de agregados.....	37
4.4. Diâmetro médio ponderado (DMP)	39
4.5. Diâmetro médio geométrico (DMG).....	40
4.6. Índice geral de estabilidade de agregados (IGEA) e AGRI	41
4.7. Resistência tênsil dos agregados dos solos (RT)	43
4.8. Porosidade total (PT) e distribuição do tamanho de poros (DTP)	44
4.9. Volume elementar representativo (VER).....	45
4.10. Análises químicas dos solos.....	46
4.11. Coeficiente de correlação de Pearson e índice de qualidade do solo (IQS).....	46
5. CONCLUSÕES	53
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar, sua técnica de plantio e colheita têm importância histórica em todo Brasil. Dela são extraídos produtos fundamentais à sociedade, como açúcar e biocombustíveis. No setor agrícola canavieiro, a qualidade do manejo e a conservação do solo são amplamente discutidas, tendo-se como finalidade a obtenção de novas estratégias que contribuam com maior rendimento da área possível para cultivo. No estado de Pernambuco o cultivo da cana-de-açúcar se caracteriza como uma das principais fontes econômicas no âmbito agroindustrial.

A prática da queima da vegetação pode ser provocada de forma direta ou indireta, via ações antrópicas. Em território brasileiro, o fogo é utilizado em vários processos como o de limpa em áreas de manejo agrícolas e florestais, renovação de cultivos, abertura de áreas para produção agrícola e controle de pragas. Na colheita da cana-de-açúcar, é comum o processo de queima prévia para facilitar o processo em si; contudo, inúmeros problemas podem ocasionar mudanças na qualidade do solo. Entre as consequências para o solo causadas pelo processo de queima da palhada da cana, estão: aumento da densidade do solo, pela diminuição de poros maiores; redução da cobertura superficial e, conseqüentemente, uma possível diminuição do carbono do solo e exposição aos agentes erosivos, como chuva e vento.

A qualidade do solo pode ser definida como a capacidade de um tipo específico de solo funcionar como um ecossistema natural, ou sob manejo para sustentar a produtividade animal e vegetal, manter a qualidade da água e do ar e suportar o crescimento humano. Os vários conceitos de qualidade do solo são utilizados para avaliações das condições de manejo dentro dos agrossistemas, sendo frequentemente estudada por meio de seus atributos físicos, químicos e biológicos.

Na avaliação da qualidade física do solo, dentre os atributos mais utilizados, destacam-se aqueles relacionados ao arranjo de partículas sólidas e os espaços porosos dentro do solo, tais como: densidade do solo; porosidade total e sua distribuição por classes de tamanho de poros; condutividade hidráulica do solo saturado; resistência tênsil de agregados; resistência do solo à penetração de raízes; índices de estabilidade de agregados. A agregação do solo é vital para sua estabilidade, atenuando os processos erosivos e de compactações decorrentes da mecanização agrícola. Portanto, é um fator diretamente relacionado à resistência do solo aos diversos tipos de processos externos e internos.

A estrutura do solo é um importante atributo devido à sua influência na dinâmica da água e do ar, bem como no desenvolvimento vegetal. Porém, por ser um atributo complexo normalmente não é avaliada diretamente, mas sim por meio de indicadores qualitativos, que estejam a ela relacionados. Desse modo, a maior parte dos estudos envolvendo agregados de solos avaliam a interferência do uso e manejo do solo na sua qualidade estrutural, que está associada à biota do solo, matéria orgânica e fração argila, em razão da sua atuação como agentes cimentantes, podendo ser impactados por tais processos.

Nesse sentido, uma das abordagens mais usuais na avaliação da estrutura do solo é a distribuição dos agregados em faixas de tamanhos, definida com base nos diâmetros equivalentes, agrupando-os em classes, que indicarão a condição da estrutura do solo após a aplicação de alguma força de ruptura, em condições úmidas ou secas.

Portanto, os ensaios para determinação dos índices de estabilidade de agregados do solo (IEA) são determinados a partir da seleção de grupos de agregados que variam seu diâmetro dentro de uma faixa preestabelecida. Assim, os IEA representam atributos que refletem a condição estrutural do solo, avaliando a sua resistência aos processos de estresse físico, a exemplo do diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) de agregados. Seus resultados têm relações com outros fatores do solo, como retenção de água, aeração e atividade microbiana, sendo afetados pelo teor carbono no solo, porosidade, textura e matéria orgânica. Por outro lado, esses fatores são afetados diretamente pelo cultivo, manejo e método de colheita da cana-de-açúcar.

Outro atributo físico utilizado para avaliar a condição estrutural do solo é a resistência tênsil de agregados (RT), definida como a força aplicada ao agregado por unidade de área para promover sua ruptura. Após a fratura, o agregado ficará dividido ao meio, e a força para quebrar cada parte será duas vezes maior que a anterior, seguindo assim esse padrão. A RT está diretamente ligada a outros atributos e processos do solo, como umidade, teor e tipo de argila, carbono orgânico, ciclos de umedecimento e secagem, compactação, sendo uma medida sensível às alterações na estrutura do solo sob sistemas de manejo.

Embora a separação dos agregados dos solos seja um dos procedimentos para determinação da RT e dos IEA, não há um consenso metodológico na definição do tamanho da amostra a ser usado nos ensaios, o que leva à necessidade de se delimitar o tamanho representativo dos agregados para tais ensaios. Neste sentido, a determinação do volume elementar representativo (VER) tem como objetivo estabelecer o tamanho do corpo de prova (amostra), a partir do qual o resultado de um atributo não se altera com o aumento do volume

da amostra, sendo grande o suficiente para representar as características de campo, definidas por atributos específicos do solo.

Desse modo, espera-se que os resultados obtidos nessa pesquisa definam a qualidade estrutural do solo e sua relação com o método de colheita da cana, detectando-se nuances entre os valores dos atributos, a partir de amostras de tamanho representativo definido com base no VER.

1.1 Hipóteses

- A colheita da cana-de-açúcar sob processo de queima promove mudanças negativas na qualidade estrutural do solo (DMP, DMG, IGEA, AGRI e RT) quando comparado com colheita da cana crua, devido a perda da sua porosidade e aumento da densidade.
- A resistência tênsil de agregados e os de índices de estabilidade de agregados do solo, quando determinados a partir do volume elementar representativo, geram resultados mais exatos na avaliação dos impactos negativos da queima na condição estrutural do solo em tamanhos de agregados com diâmetros equivalentes com 5,32; 11,5 e 17,6 mm.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar os impactos dos sistemas de colheita da cana-de-açúcar (queima *versus* crua) na condição estrutural de solos via indicadores da sua qualidade física.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar os atributos dos solos estudados para sua caracterização física (distribuição das frações granulométricas, relação silte/argila, grau de flocculação, porosidade total - PT, densidade do solo - Ds), e química (carbono orgânico).
- Determinar a resistência tênsil de agregados (RT), a partir das amostras representativas das duas classes de tamanho de agregados (22 e 44 mm).
- Determinar o diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice geral de estabilidade de agregados (IGEA) e AGRI, a partir das amostras representativas das três classes de tamanho de agregados (5,32; 11,5 e 17,6 mm).

- Estabelecer o volume elementar representativo para as amostras de agregados dos solos, utilizados nos ensaios de determinação dos indicadores da sua qualidade física: RT e índices de estabilidade de agregados (IEA).
- Relacionar os resultados de RT e dos IEA com os demais atributos físicos: PT, Ds e frações granulométricas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultivo e manejo da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma cultura de vital importância para o agronegócio e setor de bioenergia do Brasil. Na safra 2021/2022, estima-se área total de 8,2 milhões de hectares, com produção de 596,1 milhões de toneladas de colmos, 40,2 milhões de toneladas de açúcar e 28,66 bilhões de litros de etanol. Em Pernambuco, para a safra de 2022/2023, está prevista uma área cultivável de 233,9 mil hectares e 14.055,1 mil toneladas colhidas (CONAB, 2022).

Nas práticas de manejo do solo o uso do fogo tem sido extremamente comum no território brasileiro, principalmente em áreas rurais, sendo utilizado com a função de limpeza da área e preparo do solo para plantio ou colheita. Quando a queima é aplicada em determinada área, os atributos físicos, químicos e biológicos do solo são afetados de forma direta ou indireta, a depender da duração, intensidade e características do sistema atingido (topografia, clima, composição biológica do solo), sofrendo alterações que podem afetar o cultivo local (BARREIRO et al., 2010; MUÑOZ-ROJAS et al., 2016). A matéria orgânica do solo e agregação do solo são extremamente relevantes para as propriedades do solo (ZHANG et al., 2016), e podem ser afetadas diretamente pelo processo de queima.

Santín e Doerr (2016) obtiveram resultados que comprovam que o fogo pode induzir mudanças na matéria orgânica do solo, quando a temperatura da queimada atinge a faixa entre 200 e 250 °C. Na mesma linha desses autores, outros resultados comprovam que a matéria orgânica do solo é diretamente afetada imediatamente após a queima, quando realizada de forma severa (GIRONA-GARCÍA et al., 2018). Em contrapartida, como analisado por Fultz et al. (2016), foi observado que a queima não produz efeito na matéria orgânica, enfatizando que a temperatura da queima é de vital importância para essa conclusão.

Alguns estudos também demonstram que o fogo causa inúmeras mudanças no sistema trifásico do solo, promovendo alterações na proporção entre as fases sólida, líquida e gasosa. Neste sentido, Fox et al. (2007) realizando ensaios em laboratório, verificaram que a

condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}), após processo de queima, teve maiores reduções de valores quando determinada em agregados de solos com diâmetro equivalente ($\phi_{eq.}$) entre 0,4 e 2,0 mm, registrando-se diminuição de 37%, quando comparados aos resultados gerados por solos manejados sem a queima, onde seus agregados, com $\phi_{eq.}$ entre 2,0 e 5,0 mm, apresentaram redução de 23% nos valores de K_{sat} . Contudo, efeitos contrários da queima nas propriedades do solo têm sido relatados na literatura (ALCAÑIZ et al., 2018), comprovando que não há consenso sobre o tema.

2.2. A estrutura do solo

Os solos têm função vital para toda humanidade, e seu estudo condiz com a necessidade de entendimento dos processos que neles ocorrem e uso; a degradação do solo influencia o desenvolvimento de estudos para entender as ações humanas e suas relações com o manejo e uso do ambiente em que vivemos. As interações do solo entre o ar, água, litologia e seres vivos fazem esse sistema ser importante para a sociedade; logo esse ambiente influencia a qualidade dos bens que dele dependem, como os seres vivos sua sobrevivência e desenvolvimento (LEPSCH, 2011; TYE; ROBINSON; LARK, 2013).

Para se entender a natureza dos solos é comum sua divisão em atributos físicos, químicos e biológicos (BÜNEMANN et al., 2018; SILVA et al., 2020); são comumente utilizadas algumas especificidades para seu entendimento, sendo essas: porosidade, matéria orgânica, estrutura, condutividade hídrica ou microbiotas (KRISTIANSEN et al., 2006; WANG et al., 2017; BARROS et al., 2010; CASTIONI et al., 2018; LUAN et al., 2021).

A estrutura do solo é um dos principais atributos estudados no que diz respeito à dinâmica do solo em relação à água e espécies vegetais; essa estrutura é definida pela forma, disposição dos sólidos e vazios do solo (LAL, 1991; ROSSI et al., 2016). Bronick e Lal (2005) citam que a estrutura do solo é alterada por manejos como rotações de culturas, mecanização e a cobertura do solo; esses fatores modificam a parte física do solo e consequentemente interferem diretamente em sua estrutura.

2.3. Efeito do cultivo e manejo nos atributos físicos do solo

Karlen et al. (1997) definiram a qualidade do solo como a sua capacidade de sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar e dar suporte para habitação e saúde humana. Manter o bom funcionamento de todas essas funções é necessário para o equilíbrio e sustentabilidade do solo. A avaliação da qualidade do solo após a queima, observando seus atributos físicos, químicos e microbiológicos, e a comparação

com uma área sem esse processo, é vital para o conhecimento do efeito da prática sobre a funcionalidade e sustentabilidade do solo. Pereira et al. (2019) comentam que processos de queimadas podem afetar diretamente ou indiretamente o solo, pelo seu aquecimento ou acúmulo de cinza

Quando o solo atinge a temperatura de 270 °C a repelência da água nos poros tende a crescer, atingindo máximos valores em temperaturas acima de 300 °C (ARCENEGUI et al., 2019). O contrário é observado em relação aos índices que avaliam a condição estrutural do solo, onde o diâmetro médio ponderado e a estabilidade de agregados em água, bem como a matéria orgânica, diminuem com o aumento da temperatura (BADIA; MARTI, 2019).

Solos com texturas mais argilosas apresentam um ambiente com alta capacidade de retenção de água e com maiores tamanhos de agregados, além de alta capacidade de troca catiônica (REDIN et al., 2011). Por outro lado, a alteração de fatores físicos como porosidade do solo e sua densidade, e conseqüentemente, a resistência tênsil e estabilidade de agregados, irá resultar em mudanças na retenção de água do solo, tornando-o mais suscetíveis aos processos de degradação (CHERUBIN et al., 2016).

2.4. Alterações da qualidade do solo devido à queima

A densidade do solo (D_s) é um dos atributos suscetíveis ao aumento quando ocorrem alterações nas propriedades físicas do solo, como a diminuição do volume de macroporos, promovendo mudanças vitais em virtude de alterações na taxa de infiltração da água, acarretando inúmeras mudanças no ambiente do solo, desde dificuldades em seu manejo até processos erosivos mais extensos (UTSET; CID, 2001).

A matéria orgânica do solo (MOS) está associada à força de ligação entre as partículas minerais do solo, assim como o arranjo das partículas. Essas associações da MOS, assim como sua origem e estado de decomposição química, irão determinar os seus efeitos na resistência do solo. O aumento do número de poros menores tem como efeito a redução da densidade, e a resistência à compressão irá diminuir, a MOS acrescenta maior resistência do solo à compressão devido ao aumento da elasticidade do solo (BRAIDA et al., 2010), por conta do efeito conjunto sobre a D_s .

A adição de carbono orgânico no solo pelo resíduo da cana-de-açúcar morta por muitos anos (CARVALHO et al., 2017; TENELLI et al., 2019), além da presença da macro e microfauna, contribuem para a formação de agregados que são essenciais para a melhora na qualidade física do solo em longo prazo. Logo, essa proteção causada por esses resíduos de cana-de-açúcar preservam a qualidade física da área de cultivo (CASTIONI et al., 2019;

LEHMANN et al., 2017).

Inbar et al. (2014) concluíram em seus estudos que o teste de hidratação realizados indicaram que solo com temperatura a 300°C poderia aumentar a estabilidade de agregados, em virtude, possivelmente, da desidratação dos minerais de argila 2:1 e da transformação de óxidos de ferro e alumínio, que atuam como agentes cimentantes, levando a forte interação entre o solo e suas partículas. Segundo esses autores, essa estabilização do agregado diminuiu sua degradação pelo impacto da gota de chuva e umedecimento rápido do solo, bem como a formação de selos e as quantidades de escoamento e perda de solo.

Em relação aos índices de estabilidade de agregados dos solos (IEA), Ceddia et al. (1999) avaliaram o diâmetro médio ponderado de solos (DMP) e observaram que seus valores são reduzidos quando em lavouras de cana com colheita sob queima, promovendo a degradação geral das propriedades do solo, além de também evidenciar o aumento da densidade do solo na profundidade de 0 a 5 cm; devido a diminuição do acúmulo de macroagregados, ocasionando uma diminuição da infiltração da água no solo e intensificando processos primários de erosão.

A ocorrência de mudanças nos fatores físicos no solo por variáveis como a MOS e IEA foi descrita por Blair (2002), onde a extinção da queima dos canaviais aumentou a ocorrência de macroagregados estáveis junto com os resíduos verdes (SOUZA, 2005), onde esses fatores podem ocasionar diminuição da velocidade de infiltração instantânea da água no solo e conseqüentemente uma melhor estruturação.

2.5. Resistência tênsil de agregados do solo

A resistência tênsil de agregados do solo (RT) é um indicador sensível às mudanças na estrutura do solo (BLANCO-CANQUI; LAL, 2006), sendo definida como a força de compressão ou de tração, por unidade de área, requerida para que o agregado se rompa (DEXTER; WATTS, 2000). Os resultados de RT refletem a energia necessária para quebra em agregados menores durante o cultivo do solo; podendo esse atributo ser usado como fator de medição da habilidade de raízes na penetração do solo (IBARRA et al., 2005).

A RT do solo pode ser controlada por muitos fatores, como adsorção de cátions, quantidade de argila dispersa e conteúdo de água no sistema (UTOMO; DEXTER, 1981). Em relação ao conteúdo de água dos agregados para os ensaios de determinação da RT, Dexter e Kroesbergen (1985) sugerem que a umidade dos agregados selecionados seja equilibrada em estufa (105°C), antes dos ensaios de compreensão, devido ao aumento da plasticidade com o teor de água presente. A respeito disso, outros autores padronizam a umidade dos agregados

em condições de temperatura ambiente (ALMEIDA, 2008; MOTA et al., 2021; QUEIROZ et al., 2023; REID et al., 2022; TORMENA et al., 2008), a 60°C (FIGUEIREDO et al., 2011) e a 65°C (FAUSTINO et al., 2021), mostrando não haver consenso sobre o tema.

A determinação da RT pode ser realizada por meio de testes diretos e indiretos (DEXTER; WATTS, 2000). Segundo Imhoff et al. (2002), o teste direto é a aplicação de duas forças de magnitude e direção de sentido contrário, de forma direta em duas extremidades do agregado (tensão), até rompê-los em duas partes iguais. Já para os testes indiretos, a força é aplicada indiretamente sobre o agregado, na mesma direção e sentido; via compressão em placas metálicas, sendo essa força transmitida através do diâmetro do agregado, produzindo assim estresse, levando à sua ruptura. Quando a força tênsil no centro da amostra supera as forças que mantêm unido o agregado, forma-se um ponto de ruptura no centro, dividindo o agregado em unidades menores, porém com maior resistência para sua ruptura (DEXTER; WATTS, 2000). Segundo esses autores, uma vez dividido o agregado, a ruptura das partes restantes ocorrerá com a aplicação de uma força maior. Desse modo, a RT no momento da quebra do agregado, representa um valor igual ao do estresse tênsil.

2.6. Agregação do solo

Tisdall e Oades (1982) denominam agregados do solo aquelas estruturas formadas pela união das partículas primárias do solo, matéria orgânica e outros agregados do solo, sendo essa agregação a principal forma de estruturação do solo, elevando a porosidade total (principalmente, macroporosidade) e diminuindo a suscetibilidade aos processos erosivos (FALCÃO et al., 2020; RABOT et al., 2018).

O processo de formação dos agregados inicia-se com a floculação da argila e agrupamento das partículas primárias; esse fator forma uma estrutura composta dando sequência ao processo de formação de agregados maiores e, conseqüentemente, estruturando o solo (TISDALL; OADES, 1982). Ainda segundo esses autores, agregados com tamanhos acima de 0,25 mm recebem uma influência maior da matéria orgânica, e por essa razão formam-se agregados maiores, denominados “macroagregados”.

A porosidade do solo é um agente que é influenciado diretamente pelo tamanho dos agregados do solo. A agregação do solo tende a promover uma estrutura mais organizada e, conseqüentemente, aumenta o número de macroporos do solo, melhorando assim sua condutividade de água e de ar (RABOT et al., 2018). HILLEL (2003) afirmou que para ocorrer a cimentação do agregado que será formado é necessário acontecer a união entre as argilas e os agentes cimentantes.

Desses agentes cimentantes, em grande parte, a ação da matéria orgânica atua como variável mais importante na formação dos macroagregados. Já nos microagregados, em muitas ocasiões, as ligações que mais ocorrem são na parte mineral do solo; sendo que o sistema radicular também tem sua importância na fixação e agregação do solo em conjunto com partículas primárias maiores, que, quando em maiores quantidades, irão formar macroagregados (DEGENS; SPARLING; ABBOTT, 1996; SAIEDI et al., 2017; TISDALL; OADES, 1982).

Algumas características do solo relativas à sua estruturação são alteradas por diversos fatores, como: manejo; alterações químicas e físicas do solo, por ação das queimas, revolvimento ou exposição aos agentes químicos; e esses fatores podem diminuir a agregação do solo (BRONICK; LAL, 2005). Esses agentes de agregação associados aos fatores minerais ou biológicos, irão determinar a dimensão e a condição de estabilidade do agregado.

Materiais orgânicos em contato com a superfície do solo auxiliam na manutenção da estrutura do solo. O tipo de manejo do solo faz com que esses materiais possam estar em maior ou menor quantidade, e isso refletirá nos teores da MOS e na agregação do solo (BRONICK; LAL, 2005; FALCÃO et al., 2020).

Thomas (2011) em estudos realizados sobre a influência da temperatura no diâmetro e estabilidade de agregados em Chernossolo do Canadá constatou que, em temperaturas de 200 °C, os resultados de aplicação de fogo mostram que os agregados maiores (com diâmetro medindo 2,00 mm) foram reduzidos, sendo esses os mais afetados pela temperatura; provavelmente resultado da destruição dos agentes cimentantes dos agregados, como a MOS. O autor também afirma que temperaturas entre 100 e 150 °C são facilmente alcançadas pelo fogo em áreas agrícolas, e sugere que nesse intervalo entre temperaturas também há possibilidade de ocorrer alterações na estabilidade dos agregados.

2.7. Diâmetro médio ponderado, geométrico e índice geral de estabilidade do solo

Rabot et al. (2018) citam que a análise por meio da distribuição de classes de agregados e distribuição por tamanho seria sua forma mais comum de caracterização. Nesses ensaios são analisados três atributos relacionados à agregação do solo, sendo eles: diâmetro médio ponderado - DMP, diâmetro médio geométrico - DMG, e o índice geral de estabilidade de agregados - IGEA (BRIZZI et al., 2019; SALTON et al., 2017).

O DMP foi proposto pela primeira vez por Van Bavel (1950), sendo mais tarde simplificado por Kemper e Rosenau (1986), e representa um valor que condiz com uma estimativa da quantidade média do tamanho de agregados (em mm) que mais ocorre no solo;

logo à medida que a porcentagem de agregados maiores ocorrerem os valores desse indicador também aumentarão (DEMARCHI; PERUSI; PIROLI, 2012).

Mazurak (1950) propôs o DMG com base na ideia já discutida para esse índice, que representa uma estimativa de qual classe de agregados ocorre em maior frequência. Assim, o DMG consegue se aproximar mais dos valores reais entre os índices de agregação do solo, (KEMPER; ROSENAU, 1986), onde quanto maior for a presença de agregados com maior tamanho mais bem estruturados será o solo (BRIZZI et al., 2019; NOURI et al., 2012)

O IGEA é o índice que representa a total de agregação do solo, sendo uma medida que não leva em consideração a distribuição de classes de agregados e sim o índice geral de estabilidade dos agregados. Os valores desse índice são diretamente afetados pela presença de agregados $< 0,25$ mm, uma vez que, quanto maior a quantidade de agregados menores, menor será a agregação, resultando em menores valores de IGEA, indicando uma baixa qualidade estrutural (DEMARCHI; PERUSI; PIROLI, 2012).

Outro índice que avalia a qualidade estrutural de solos é o AGRI, definido como a porcentagem de agregados estáveis com diâmetro $>2,00$ mm. Logo, este índice também representara uma qualidade estrutural do solo, demonstrando a proporção de agregados com dimensões maiores (WENDLING, 2005).

Os índices de estruturação do solo comentados anteriormente são altamente suscetíveis ao teor de matéria orgânica do solo e suas alterações devido ao uso e manejo (RABOT et al., 2018; SIX; PAUSTIAN, 2014). Os parâmetros utilizados para quantificação da estrutura do solo são escolhidos devido sua relação entre os seus resultados com as características do agregado, e também pelas alterações nos seus valores indicarem mudanças na qualidade estrutural do solo e na resistência do agregado às rupturas.

2.8. Volume elementar representativo (VER)

O solo é descrito como um sistema trifásico (sólido, líquido e gasoso), heterogêneo, disperso, poroso, onde sua área de conexão por unidade de volume ser extremamente grande (HILLEL, 1998). Os atributos físicos que vão depender de arranjo estrutural do solo, variam consideravelmente dentro de um volume. Para o estudo do atributo a ser determinado é necessário considerar um volume do solo, estatisticamente representativo, e que se adeque à sua caracterização (VIK et al., 2013). Nesse sentido, o volume elementar representativo (VER) foi definido como o mínimo volume de uma amostra a partir do qual o resultado de um atributo se torna independente do tamanho da amostra, sendo grande o suficiente para representar as características e heterogeneidades do corpo de prova (BEAR, 1975).

Avaliar os impactos devido às práticas de manejo, ao longo de áreas amplamente cultivadas, requer a quantificação das modificações na estrutura do solo (GERKE, 2020). Para tal objetivo, os atributos do solo que são usados para estudo de caso devem refletir a real condição da área de campo, em que a representatividade desses valores dependerá do uso das amostras cujos tamanhos são obtidos seguindo como referência a ideia do VER, e utilizados nos seus respectivos ensaios.

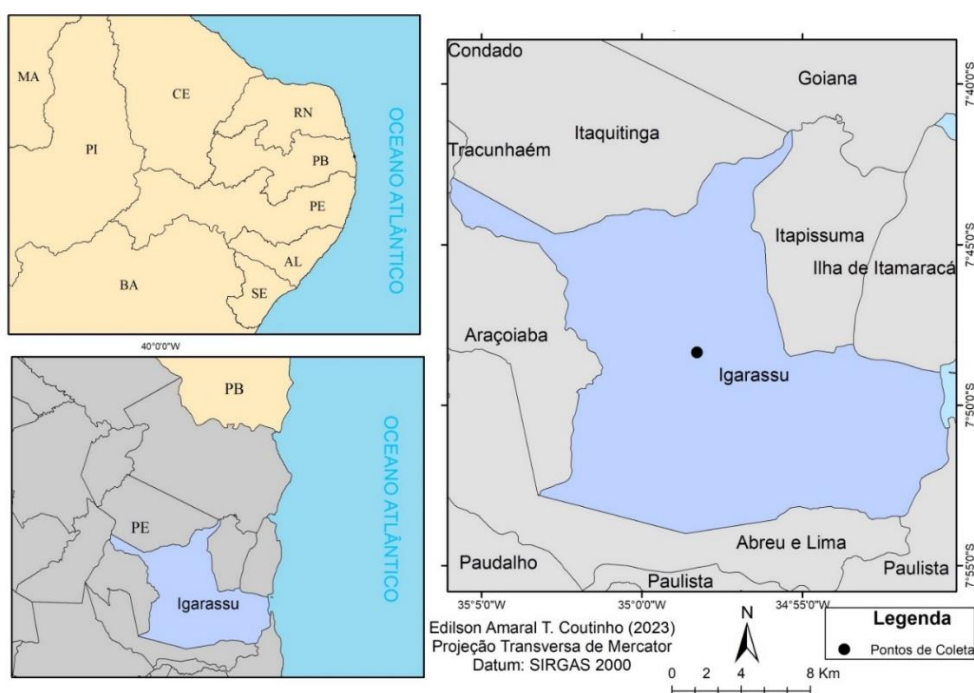
Para esses ensaios é necessário então estabelecer tamanhos que respeitem critérios específicos, trazendo ao processo uma variância mínima em relação à mudança de tamanho do agregado utilizado na amostra e com essa informação é possível estabelecer bases utilizando o VER nas análises para estabelecer atributos estruturais do solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da área

O solo utilizado na pesquisa foi coletado na Usina São José Agroindustrial, localizada no município de Igarassu, na região metropolitana do Recife (Figura 1), sendo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (SANTOS et al., 2011).

Figura 1 - Localização do município de Igarassu-PE e do local de coleta dentro do município.



Fonte: arquivo pessoal

A Usina São José tem a sede localizada sob as coordenadas geográficas $7^{\circ} 49' 5,26''$ Sul e $35^{\circ} 0' 44,46''$ Oeste, e em altitude de 98 m; o clima é tropical úmido com menores taxas

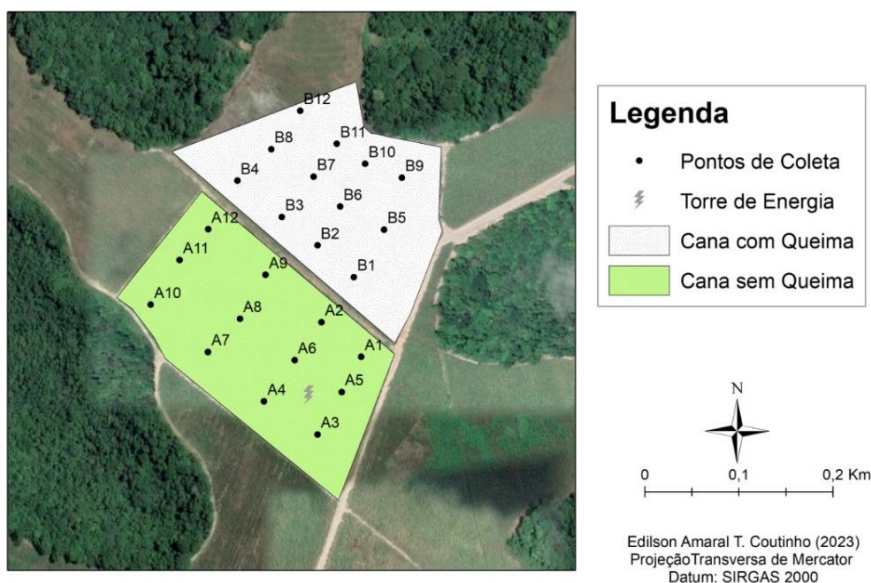
pluviométricas no verão, a vegetação é típica da Zona da Mata, uma Formação Florestal Perenifólia Latifoliada Higrófila Costeira. O clima é do tipo Am's segundo Köppen, com mudanças pontuais para o tipo As. A temperatura média anual é de 27°C, com umidade relativa do ar em torno de 80% (ANDRADE-LIMA, 1960) com média pluviométrica anual de 1.975 mm (APAC, 2022). A mata é formada por um estrato arbóreo variando entre 8 e 15m de altura, e um estrato herbáceo- arbustivo.

O solo estava sob cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), e, de acordo com Cavalcante et al. (2020), parte da zona da mata pernambucana, com forte presença da mata atlântica, foi convertida para cana-de-açúcar desde 1973 que, com o passar dos anos, esse cultivo apenas se intensificou na região. A área de estudo tem canavial com colheita sob queima há aproximadamente cinco anos, e outro com mesmo tempo de manejo, mas com colheita realizada com a cana crua (neste há uma linha de transmissão, justificando o uso obrigatório da colheita sem queima).

3.2 Coleta das amostras de solo e pré-tratamentos para os ensaios

Na área experimental foram utilizados talhões de dimensões com aproximadamente 100 m de largura por 100 m comprimento, definindo a área de exclusão do efeito de borda, que ficou em 7 m de distância na horizontal e 5 m de distância na vertical, com 93 m de largura com 95 m de comprimento (Figuras 2 e 3). A coleta dos solos ocorreu durante o mês de agosto de 2022, com a cana já na metade do seu quinto ciclo (Figura 4A e 4B).

Figura 2 - Croqui demonstrando a disposição dos pontos de coleta na área experimental.



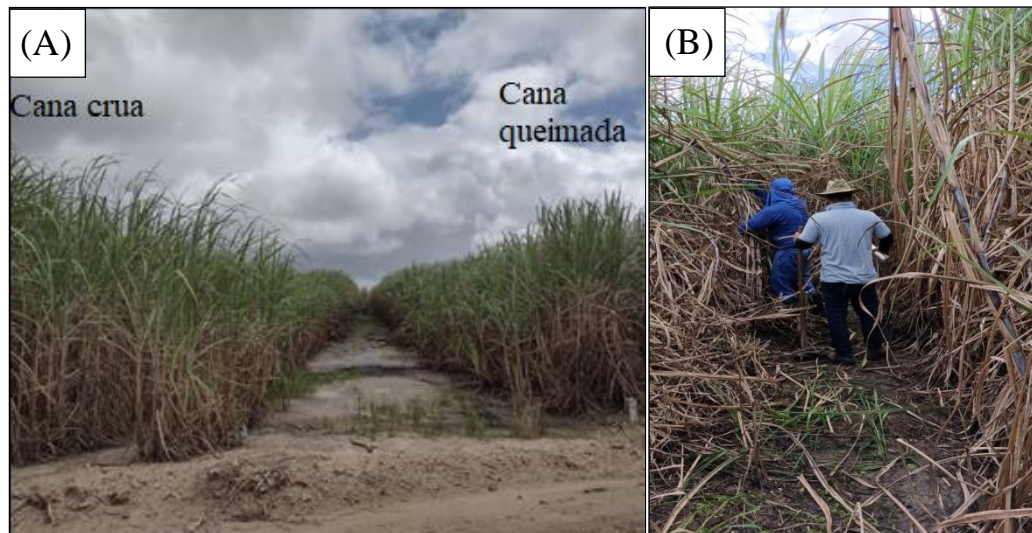
Fonte: arquivo pessoal.

Figura 3 - Imagem aérea da área de estudo via drone, ilustrado o canavial sob os dois tratamentos (colheita crua *versus* queima), tendo-se ao fundo a mata nativa.



Fonte: arquivo pessoal.

Figura 4 - Vista do talhão com espaço referente à bordadura (A) e entrelinha (B).

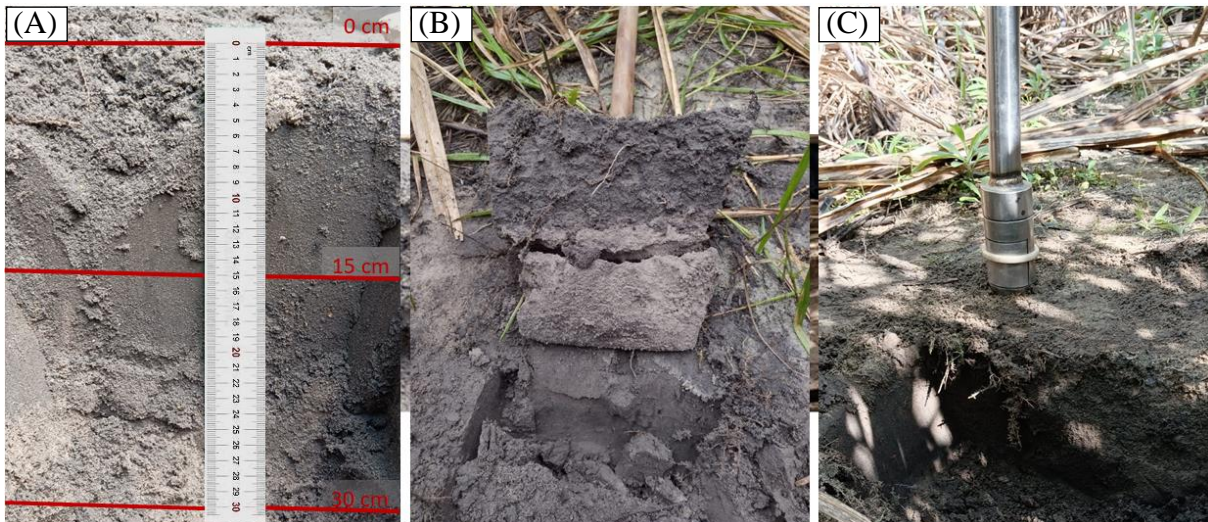


Fonte: arquivo pessoal.

A amostragem foi realizada nas profundidades de 0 a 30 cm. Para tanto, foram abertas trincheiras com dimensões de $30 \times 30 \times 30$ cm (Figura 5A) e, com o auxílio de pá reta e faca, retiraram-se, cuidadosamente, blocos de uma das laterais (Figura 5B), seguindo-se metodologia sugerida em Marcelo et al. (2016). Os blocos foram envolvidos em plástico filme e plástico bolha e acondicionados em caixa de isopor, para evitar alterações na estrutura durante o transporte para o laboratório.

Em cada trincheira aberta ao longo do talhão, além dos blocos, foram também coletadas amostras com estrutura não deformada, obtidas em cilindro volumétrico ($\cong 100 \text{ cm}^3$), inseridos ao solo com auxílio de um amostrador tipo Uhland (Figura 5C)

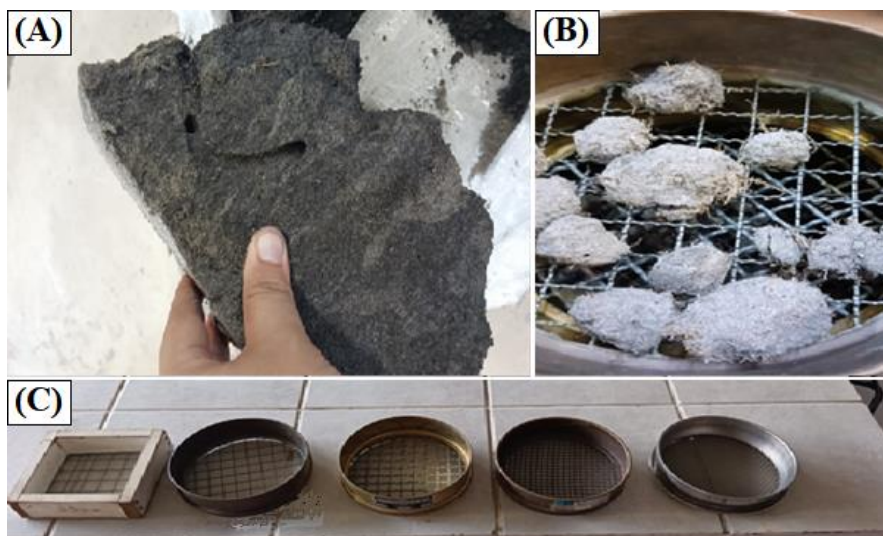
Figura 5 - Visão lateral da trincheira usada para a coleta (A); remoção das amostras em blocos de solo (B); coleta das amostras em anéis volumétricos via Uhland (C)



Fonte: arquivo pessoal.

No laboratório, os blocos foram saturados e submetidos à drenagem natural em temperatura ambiente (25 °C) até atingirem a capacidade de campo. Na sequência, os blocos foram pré-selecionados (Figura 6A), e fracionados manualmente em blocos menores (torrões, agregados), passados em peneiras (Figura 6B), com aberturas de malhas (diâmetros) medindo: 24,00; 20,00; 15,90; 15,20; 7,10 e 3,54 mm (Figura 6C).

Figura 6 -Torrões utilizados no fracionamento (A); processo de tamisação em peneiras (B); conjunto de peneiras utilizadas para a obtenção dos agregados (C).



Fonte: arquivo pessoal.

Desse modo, os agregados que passaram na primeira peneira (malha com 24 mm) e foram retidos na segunda (20 mm), tiveram o diâmetro médio de 22 mm; os que passaram na malha com abertura de 20 mm e ficaram retidos na de 15,2 mm, tiveram diâmetro médio de

17,6 mm; as malhas com abertura de 15,9 e de 7,10 mm resultaram em agregados com diâmetro médio 11,5 mm; e o conjunto de malhas com abertura de 7,10 mm e 3,54 mm resultou em agregados com diâmetro médio de 5,32 mm, conforme ilustrado na Figura 7A. Para os agregados maiores de 22 mm foram utilizadas medidas similares à bolas de isopor de diâmetro previamente medido como equivalente a 44 mm, sendo também validado o tamanho de 22 mm com a esfera correspondente, como demonstra os círculos ilustrativos na Figura 7B.

Figura 7 - Agregados utilizados nos ensaios em variados tamanhos (A); os círculos em vermelho indicam as esferas de isopor utilizadas como padrões de volumes para obtenção das classes de tamanho dos agregados (B).



Fonte: arquivo pessoal.

Estes agregados foram reservados para os ensaios de determinação dos índices de agregação de solo e a determinação do volume elementar representativo, enquanto os anéis volumétricos foram utilizados para os ensaios de porosidade total (PT) e distribuição do tamanho de poros (DTP).

O restante dos blocos foi seco ao ar, destorroado e passado em peneira com malha de abertura de 2 mm, obtendo-se assim a terra fina seca ao ar (TFSA), sendo essa forma de amostra utilizada nos demais ensaios de caracterização física e química. Parte da TFSA foi macerada e tamisada em peneira de 80 mesh, sendo reservada para análise de carbono orgânico total (CO).

3.3 Atributos físicos e químicos para caracterização dos solos

Os solos foram caracterizados física e quimicamente, sendo determinado: frações granulométricas (areia, silte, argila total); argila dispersa em água e carbono orgânico total, cujos procedimentos estão brevemente descritos a seguir.

3.3.1 Granulometria

A granulometria e a argila dispersa em água foram determinadas utilizando-se o método do densímetro com modificações (ALMEIDA, 2008; GEE; OR, 2002). Assim, foram

pesados 50 g de TFSA, transferidos para garrafa plástica; utilizou-se o dispersante Calgon (hexametáfosfato de sódio + carbonato de sódio), adicionando-se 25 mL para cada garrafa e completando-se o volume de 100 mL com água; na sequência, as garrafas foram transferidas para o agitador tipo Wagner (50 rpm, 16 horas). Após este processo, transferiu-se o material das garrafas para provetas de 1 L, completando com água até o volume de 940 mL; após agitação, a suspensão foi deixada em repouso por 24 h para, então, efetuar a leitura da fração argila em suspensão via densímetro. Na determinação da argila dispersa em água, realizaram-se os mesmos procedimentos, mas sem o uso do dispersante. Após a leitura da argila, o material das provetas foi passado em peneira de 53 μm , sendo a areia total obtida por peneiramento úmido; e o silte calculado por diferença [silte% = (areia% + argila total%) – 100].

3.3.2 Porosidade total (PT) e distribuição do tamanho de poros (DTP)

As amostras coletadas em cilindros foram utilizadas para determinação da porosidade total (PT) e a sua distribuição por tamanho de poros (DTP). A PT foi determinada utilizando-se o método de saturação, cujos procedimentos estão disponíveis em Almeida et al. (2017a), em que o solo contido em cilindro volumétrico é saturado, pesado e seco em estufa (105 °C), até atingir o peso constante. Entretanto, antes da secagem em estufa, os conjuntos cilindro-amostra foram usados para os ensaios de DTP.

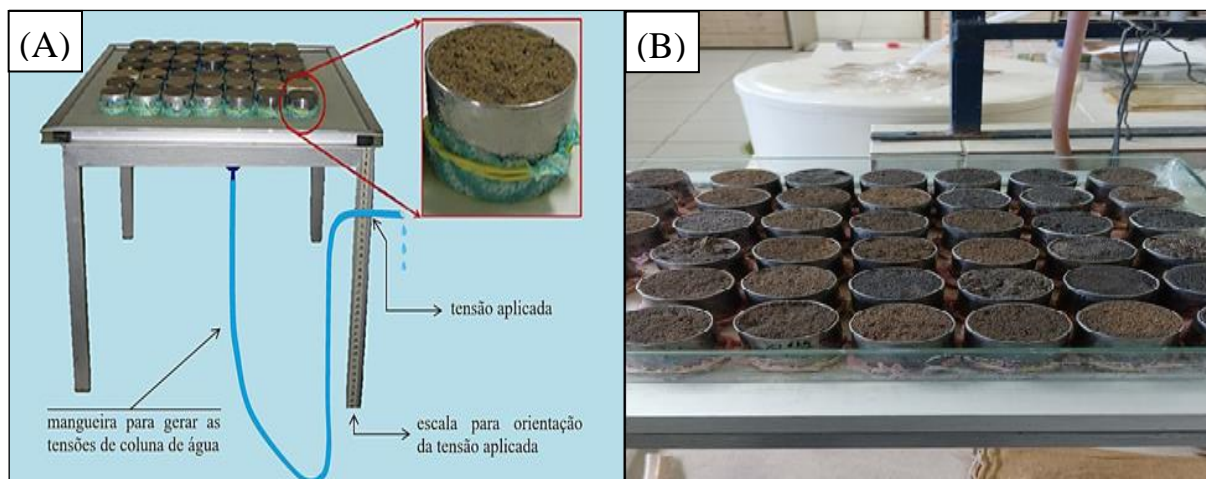
Assim, a DTP foi determinada segundo a classificação simplificada de tamanho de poros sugerida em Almeida et al. (2017a). Nessa, os macroporos são definidos como poros com diâmetro equivalente ($\varnothing_{\text{eq.}}$) > 300 μm , e, usando a equação de capilaridade universal [equação (1)], obtém-se a energia de retenção de, no máximo, 10 cca.

$$h_{(mca)} = \frac{1,5 \times 10^{-5}}{\text{raio do poro}_{(m)}} \quad (1)$$

Os mesoporos são poros intermediários, com tamanho variando entre: $50 < \varnothing_{\text{eq.}}(\mu\text{m}) < 300$ e, portanto, retêm água entre 10 e 60 cca. Os microporos foram definidos como poros com $\varnothing_{\text{eq.}} < 50 \mu\text{m}$, retendo água a uma energia superior a 60 cca, até aqueles obtidos quando a amostra está equilibrada em estufa (105 °C). No equilíbrio da energia aplicada (Ψ) para cada classe de poros foi utilizada a mesa de tensão até 100 cca (Figuras 8A e 8B).

Após cada equilíbrio, as amostras foram pesadas, secas em estufa (105°C, 24 h), pesadas novamente, obtendo-se os dados para o cálculo das umidades volumétricas (θ) em função do Ψ (ROMANO; HOPMANS; DANE, 2002).

Figura 8 - Esquemática da mesa de tensão (A); amostras em anéis volumétricos em análise na mesa de tensão (B).



Fontes: Arquivo pessoal Brivaldo Gomes de Almeida

3.3.3 Densidade do solo (Ds)

Finalizados os ensaios da DTP, foi possível calcular a densidade do solo, que foi determinada pelo método do cilindro volumétrico (ALMEIDA et al., 2017b), que se baseia na relação entre a massa de sólidos contida no cilindro volumétrico e o volume do solo, representado pelo volume do cilindro ($\pi \times r^2 \times h$), conforme a equação (2).

$$Ds = \frac{\text{Massa de sólidos}}{\text{Volume do solo}} \quad (2)$$

em que Ds é a densidade do solo, expressa em g cm^{-3} .

3.3.4 Carbono orgânico total do solo (COT)

O COT foi determinado usando a metodologia proposta por Yeomans e Bremner (1988). Foram utilizadas amostras de TFSA, maceradas e passadas em peneiras de 80 mesh, destinando-se aproximadamente 0,5 g deste material para ser colocado em tubos de digestão. Na sequência, adicionaram-se 5 mL da solução de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ e, em seguida, acrescentados 7,5 mL de H_2SO_4 concentrado, sendo o conjunto aquecido a $170 \text{ }^\circ\text{C}$ por 30 min.

Logo após o resfriamento as amostras foram transferidas para erlenmeyers de 250 mL sendo utilizada água destilada para completar o volume final ($\cong 80 \text{ mL}$). Por fim, procedeu-se a titulação com sulfato ferroso amoniacal a $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ na presença do indicador Ferroin $0,025 \text{ mol L}^{-1}$, até a coloração da mistura atingir o violeta-escuro. A porcentagem de carbono orgânico foi calculada com base no volume da solução utilizada conforme a equação (3) e (4).

$$A = \left[\frac{(Vba - Vam)(Vbn - Vba)}{Vbn} \right] + (Vba - Vam) \quad (3)$$

em que A é o volume de titulação utilizado para o cálculo da porcentagem de carbono orgânico; Vba é o volume gasto na titulação do branco com aquecimento; Vbn é o volume gasto na titulação do branco sem aquecimento; e Vam é o volume gasto na titulação da amostra.

$$COT_{(dag\ kg^{-1})} = \frac{(A)(molaridade\ do\ Sulfato\ Ferroso)(3)(100)}{peso\ da\ amostra\ (mg)} \quad (4)$$

em que 3 é o resultado da relação entre o número de mols de $Cr_2O_7^{2-}$ que reagem com Fe^{2+} (1/6), multiplicado pelo número de mols de $Cr_2O_7^{2-}$ que reagem com o C^o (3/2), multiplicado pela massa atômica do C (12); 100 é o fator de conversão de unidade ($mg\ mg^{-1}$ para $dag\ kg^{-1}$). A matéria orgânica do solo (MOS) foi estimada a partir da multiplicação entre os resultados do COT e o fator 1,724 (fator de van Bemmelen).

3.4 Índices de agregação do solo

Para o ensaio de estabilidade de agregados, foram utilizados corpos de prova divididos em três partes para produção do volume elementar representativo (VER), sendo estabelecidas amostras com diâmetro médio de 5,32, 11,5 e 17,6 mm, após passagens nas peneiras com aberturas de malhas previamente definidas. A metodologia usada teve como base o proposto em Nimmo e Perkins (2002), em que três amostras de 25 g de agregados de solo (secos ao ar, e com diâmetro médio de 5,32 mm; 11,5 mm e 17,6 mm) foram colocadas sobre um conjunto de três peneiras com abertura de malhas de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 e 0,125 mm. Uma quarta amostra de 25 g foi utilizada para a determinação do fator de correção de umidade dos agregados (fator f), corrigindo os pesos da condição de secos ao ar para secos em estufa a 105 °C. A desagregação foi realizada por peneiramento via úmida, utilizando-se do agitador do tipo Yoder (Figura 9).

Figura 9 - Mesa para peneiramento por via úmida, tipo Yoder.



Fonte: https://tecnal.com.br/pt-BR/produtos/detalhes/5938_mesa_para_peneiramento_por_via_umida.

A oscilação vertical do conjunto de peneiras sob água no Yoder teve durante de 15 min, tempo este necessário para promover a fragmentação dos agregados, nas seis classes de tamanho citadas anteriormente. Cada uma das primeiras cinco classes de agregados retidos nas respectivas peneiras foi seca em estufa (105 °C, 48h) e logo após pesadas, sendo a última classe obtida por diferença.

3.4.1 Diâmetro médio ponderado (DMP)

O diâmetro médio dos agregados da amostra foi calculado usando-se a equação sugerida por Nimmo e Perkins (2002), conforme equação (5).

$$DMP = \sum_{i=1}^n (Xi \times Wi) \quad (5)$$

em que DMP é o diâmetro médio ponderado (mm); Xi é o diâmetro médio das classes (mm); Wi é a proporção de cada classe em relação ao total.

Os valores de Xi foram calculados com base nos diâmetros de cada par de peneiras usadas para agrupar as classes de agregados, conforme pode ser observado na Tabela 1. Para a primeira classe de agregados, o Xi tem três valores, devido aos diferentes tamanhos de agregados utilizados no VER.

Tabela 1 - Diâmetro médio equivalente dos agregados (Xi) e sua respectiva classe de tamanho.

Classe de Tamanho	Xi
(mm)	
1: 5,32; 11,5; 17,6 – 2,00	3,66; 6,75; 9,95
2: < 2,00 – 1,00	1,50
3: < 1,00 – 0,50	0,75
4: < 0,50 – 0,250	0,375
5: <0,250 – 0,125	0,187
6: <0,125	0,052

3.4.2 Diâmetro médio geométrico (DMG)

O DMG, calculado segundo Kemper e Rosenau (1986) com as modificações indicadas por Cesário et al. (2010), foi obtido pela equação (6).

$$DMG = EXP \frac{\sum_{i=1}^N Wi \times \log Xi}{\sum_{i=1}^N Wi} \quad (6)$$

em que DMG é o diâmetro médio geométrico (mm); Xi é o diâmetro médio de cada classe de agregados (mm); e Wi é a massa de agregados em cada classe.

3.4.3 Índice geral estabilidade dos agregados (IGEA) e índice AGRI

O índice de estabilidade de agregados foi calculado utilizando os procedimentos sugeridos em Castro filho, Muzilli e Podanoschi (1998), expresso pela equação (7).

$$IGEA = \left[\frac{\text{Peso da amostra seca} - wp_{0,125}}{\text{Peso da amostra seca}} \right] \times 100 \quad (7)$$

em que IGEA é o índice de estabilidade de agregados (%); todos os pesos citados na equação (7) foram expressos como secos à 105 ° C.

Já o índice AGRI foi calculado com base na metodologia proposta por Wendling (2005), sendo expresso pela equação (8).

$$AGRI = w_i > 2 \times 100 \quad (8)$$

em que $w_i > 2$ é a proporção de agregados maiores que 2 mm.

3.5 Resistência tênsil de agregados de solos (RT)

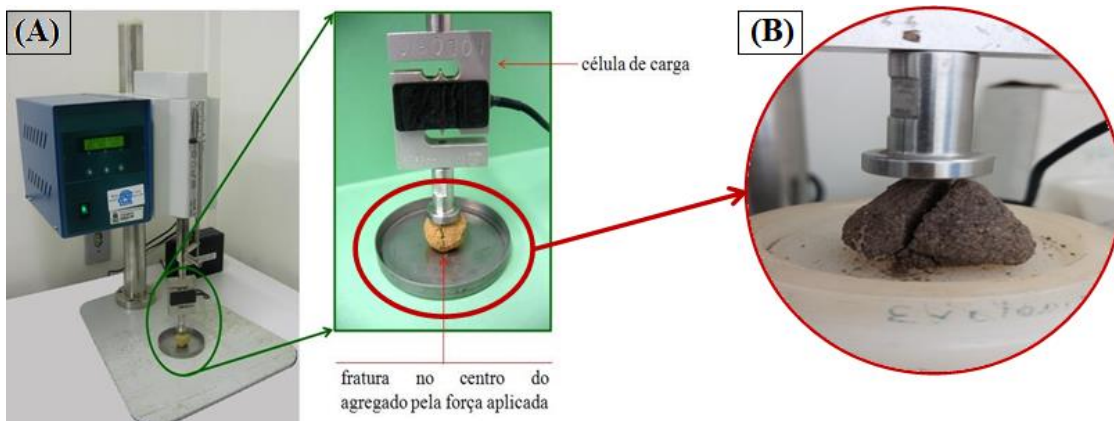
Os agregados destinados aos ensaios da RT foram separados em duas classes, com diâmetro médio de 22 e 44 mm, tendo-se por objetivo a definição do VER.

A força de ruptura dos agregados foi obtida via penetrômetro de bancada, onde os dados são registrados por sistema eletrônico de aquisição (Figura 10). A RT foi obtida por meio da equação (9), conforme Dexter e Kroesbergen (1985).

$$RT = 0,576 \left(\frac{F_{\text{máx}}}{D_{\text{ef}}^2} \right) \quad (9)$$

em que 0,576 é o valor da constante de proporcionalidade da relação entre a força compressiva aplicada e a resistência tênsil gerada no interior do agregado; $F_{\text{máx}}$ é a força máxima aplicada para ruptura do agregado (N), e D_{ef} é o diâmetro efetivo (mm), calculado segundo modelo proposto por Watts e Dexter (1998), usando a equação (10).

Figura 10 - Penetrômetro de bancada utilizado nos ensaios para determinação em laboratório da resistência tênsil dos agregados de solos, onde: (A) Detalhe da célula de carga, que registra a força máxima para ruptura do agregado; (B) Agregado após ruptura.



Fonte: Arquivo pessoal Brivaldo Gomes de Almeida

$$Def = Dm \left(\frac{M}{M_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

em que Dm é o diâmetro médio dos agregados (mm), obtido pela média aritmética das malhas das peneiras usadas na sua separação; M é a massa do agregado individual (g); e M_0 é a massa média dos agregados (g).

3.6. Volume elementar representativo (VER)

Alguns dos atributos físicos do solo frequentemente estudado apresentam metodologias que seus atributos variam até que não ocorram mais alterações dentro da representatividade do ponto específico em função do tamanho da amostra, definindo assim o VER. Isso possibilita a estabilização da propriedade a ser analisada, já que seu grau de confiabilidade não diminui em função de pequenas alterações (CORBETT et al., 1999).

Os tamanhos de agregados utilizados nos ensaios foram classes variando de: 22 mm; 44 mm, para a RT; e 5,32 mm; 11,5 mm e 17,9 mm, para o DMP, DMG e IEA, obedecendo a uma gradação de volume das amostras definida para o VER; logo após a análise de variância dos resultados o VER pode ser obtido dentre os variados tamanhos.

3.7. Análise estatística

A análise de variância (ANOVA) juntamente com o teste F foram utilizados para avaliar a ocorrência de diferenças significativas entre os procedimentos de cálculos quanto às percentagens de agregados e partículas simples nas classes de diâmetro. Nos casos com diferenças significativas, o teste de Tukey foi utilizado para comparação entre as médias em um nível de significância de 5 %. Foi realizada também a análise de correlação de Pearson entre os índices de agregação e os dados da caracterização física e química do solo.

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de hipóteses de normalidade de dados (Lilliefors teste; $p < 0,10$) e homocedasticidade (Levene teste; $p < 0,05$), sendo que, as variáveis que não apresentaram essas premissas estatísticas para a ANOVA, os dados foram avaliados por testes não paramétricos (Kruskal-Wallis teste; $p < 0,05$).

Em caso de normalidade e homoscedasticidade, os dados foram submetidos a análise de variância de classificação simples, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey HSD a $p < 0,05$. Os dados também foram submetidos a teste de multicolinearidade a $p < 0,05$, para verificar a autocorrelação e relações lineares exatas ou aproximadamente exatas, ou seja, a presença ou ausência de dependências entre as variáveis.

O diagnóstico de multicolinearidade foi realizado por meio do fator de inflação de variância (VIF), importante para as análises de correlação de Pearson ($p < 0,01$; $p < 0,05$ e $p < 0,10$) e aplicação de técnicas multivariadas.

Na avaliação da qualidade do solo e dos sistemas de manejo as variáveis foram selecionadas para um conjunto mínimo de dados, no qual as funções que os parâmetros desempenham no solo foram expressos na forma de índices, segundo o procedimento proposto em Cavalcante et al. (2021). Os dados foram analisados com o software XLSTAT, versão 2022.5.1 (ADDINSOFT, 2023).

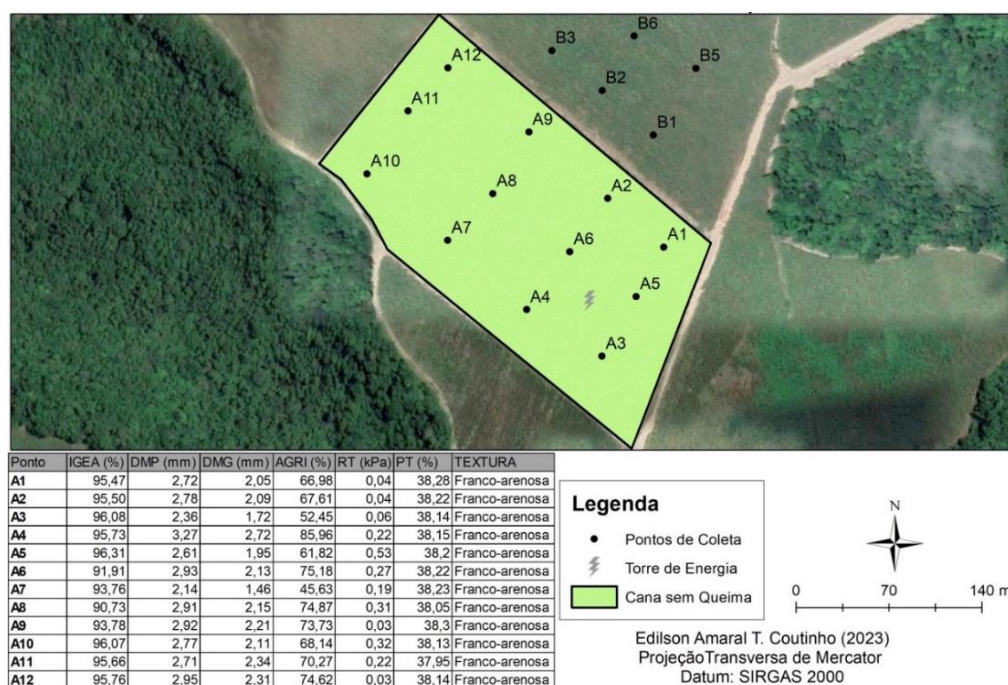
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise geoespacial das áreas

A análise geoespacial em correlação com cada ponto de coleta obtido nas três áreas de estudo possibilitou uma visão dos ambientes em que se observam menores índices estruturais do solo, além também de pontos com maiores frações de areia.

A análise espacial da área onde o processo de colheita foi realizado com a cana crua (Figura 11) demonstra maior qualidade estrutural na área mais interna e central do talhão, sendo que nos pontos 6, 4 e 8 foram obtidos os melhores índices de AGRI e maiores diâmetros médios ponderados e geométricos (DMP e DMG). A textura foi homogênea em todos os pontos de coleta, sendo franco-arenosa (ver item 4.2 Classes texturais).

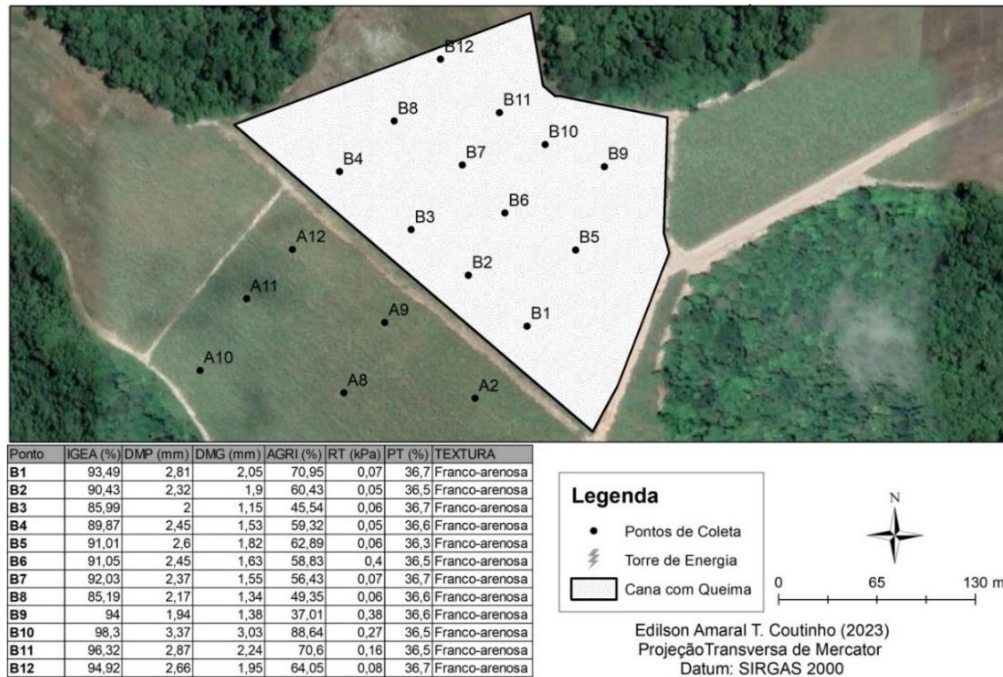
Figura 11 - Análise espacial da área de cana sem queima (crua) com os 12 pontos de coleta



Fonte: Autor

A área do canal com colheita sob processo de queima (Figura 12) demonstrou inferioridade quando em comparação área crua, principalmente em pontos como porosidade total (PT) e a resistência tênsil de agregados (RT).

Figura 12 - Análise espacial da área de cana com queima com os 12 pontos de coleta

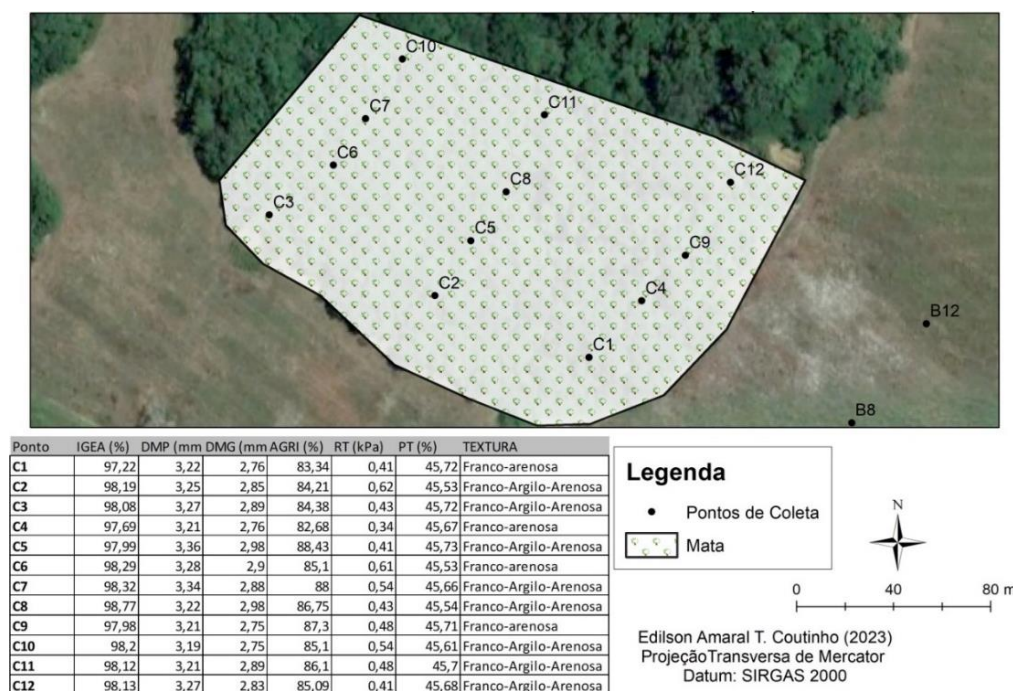


Fonte: Autor

Quanto aos índices de estabilidade de agregados, o DMP e o DMG também representaram leve inferioridade estrutural da área que passa por processo de queimadas, quando comparado aos pontos dentro da área sob cana crua. Nas áreas de borda do talhão os resultados do índice AGRI sugerem baixa condição estrutural, mostrando que os agregados se organizam com uma baixa estruturação.

Já na área de mata nativa os índices apresentaram melhores valores (Figura 13), o que já era de se esperar de um ambiente em condições naturais. Assim, os índices AGRI e o índice geral de estabilidade de agregados (IGEA) em altos valores quantitativos, com alguns pontos mais próximos à região com manejo sob queima, demonstrando algumas mudanças na qualidade estrutural.

Os atributos de RT e PT determinados em solo da mata foram positivos em comparação com as duas áreas sob manejo com cana, com uma diferença maior em comparação a área sob queima. As áreas internas da região de mata preservada foram as que demonstraram melhores condições estruturais e menos alterações em relação à sua borda.

Figura 13 - Análise espacial da área de mata nativa com os 12 pontos de coleta

Fonte: Autor

4.2 Classes texturais dos solos

A textura do solo na área de estudo foi definida como franco arenosa, tanto cana sob queima como na cana crua. Já na região de mata nativa foi classificado como franco-argilo-arenosa, com maior atividade da argila, o que condiz com melhores condições de agregação e estrutura do solo, representadas pela resistência tênsil e os índices de agregação (discutidas mais adiante).

Tabela 2 - Atributos físicos utilizados para a caracterização do solo das áreas sob cultivo de cana-de-açúcar e mata nativa.

Área	Areia	Silte	Argila	ADA	GF	Ds
C/SQ	860,13A	15,85B	124,02B	107,40B	13,68B	1,67B
C/Q	932,44A	27,35B	40,21B	20,20B	49,77A	1,70A
Mata	680,20B	66,73A	253,07A	198,44A	21,22B	1,39C

ADA = argila dispersa em água; GF = Grau de floculação; Ds = densidade do solo; C/SQ = cana crua queima, C/Q = cana sob queima; Mata = Mata nativa. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Para a densidade do solo (Ds), os valores são considerados normais para essa classe de solo (BRADY; WEIL, 1993), em que para solos mais arenosos sob manejos a Ds fica entre 1,20 e 1,80 g cm⁻³. Em relação à mata os valores foram menores (1,39 g cm⁻³) em comparação aos demais manejos, com a área sob cana queimada apresentando maior valor (1,70 g cm⁻³)

em relação à cana crua ($1,67 \text{ g cm}^{-3}$); a pequena diferença entre elas não caracteriza mudanças bruscas na Ds sob queima, uma vez que os canaviais têm pouco tempo de instalação (cinco anos)

4.3 Distribuições das classes de agregados

A distribuição das classes de agregados demonstrou o maior valor na classe 1 principalmente na região de mata nativa (Tabela 3), onde, à medida que o tamanho dos agregados aumenta, a proporção de agregados em classes menores cai de maneira acentuada, comprovando a maior estabilidade para agregados maiores, conforme Mielniczuck (1998).

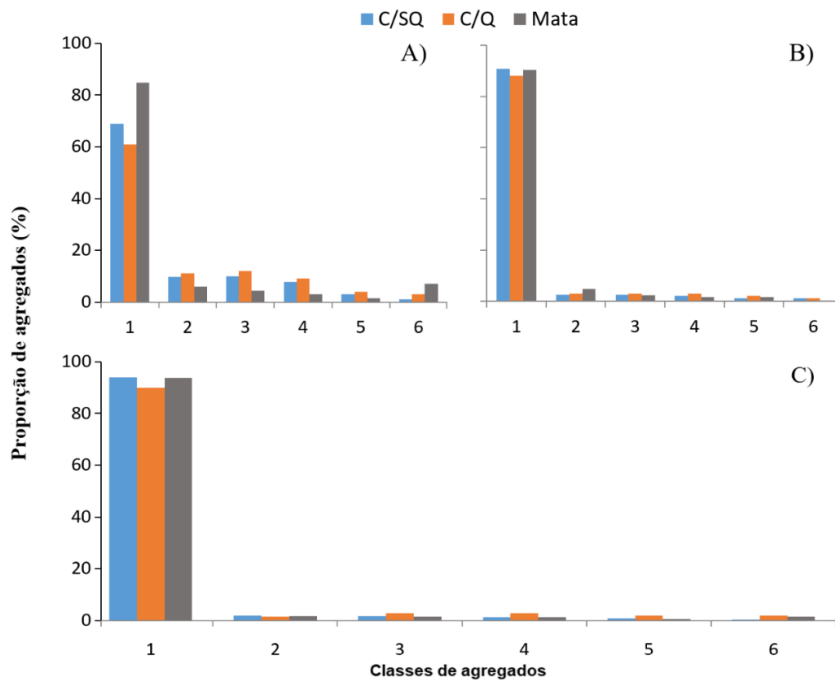
As proporções dos agregados retidos em cada classe também podem ser visualizadas nas Figuras 14 e 15. Na Figura 14 está representada a distribuição de agregados em função dos tamanhos (5,32; 11,5 e 17,6 mm) em cada um dos cultivos escolhidos. As áreas de cana sob queima e colheita crua não se mostram tão amplas quanto ao atributo estudado, principalmente ao se aumentar o tamanho dos agregados, em que a distribuição entre as classes tende a diminuir.

Tabela 3 - Massa dos agregados nas diferentes classes para as profundidades avaliadas.

Øeq. (mm)	Classe	Massa dos agregados (g)		
		C/SQ	C/Q	Mata
5,32	1	16,65	15,02	20,84
	2	2,42	2,67	1,47
	3	2,58	2,86	1,04
	4	1,86	2,21	0,73
	5	0,77	1,10	0,34
	6	0,46	0,8	0,17
11,50	1	22,5	21,85	22,36
	2	0,5	0,64	0,99
	3	0,63	0,79	0,58
	4	0,49	0,75	0,38
	5	0,32	0,44	0,38
	6	0,27	0,31	0,048
17,60	1	23,4	22,40	23,13
	2	0,46	0,37	0,42
	3	0,41	0,64	0,35
	4	0,3	0,70	0,33
	5	0,21	0,35	0,15
	6	0,10	0,44	0,35

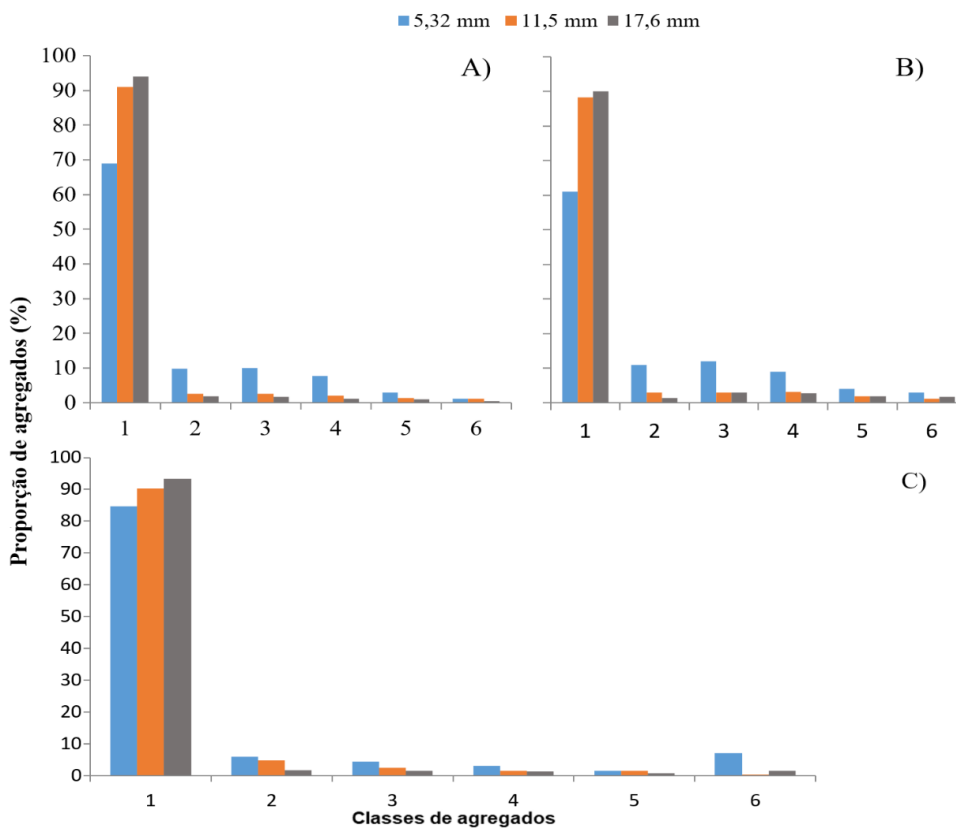
C/SQ: cana crua sem queima; C/Q: cana sob queima; Mata: Mata nativa.

Figura 14 – Proporção de agregados dos solos em cada classe de tamanhos. A) 5,32 mm; B) 11,5 mm; C) 17,6 mm.



C/SQ: Cana sem queima; C/Q: Cana queimada; Mata: Mata nativa.

Figura 15 - Proporção de agregados de solo em cada classe em função do tipo de cultivo com variados tamanhos de agregados. A) Cana crua; B) Cana sob queimada; C) Mata nativa.



É notável que para a área de mata nativa tenham-se as melhores condições de agregação do solo, nos três tamanhos, com a proporção maior na classe 1; porém a diferença para a área de cana com queima e sem queima não se mostra tão ampla, principalmente ao se aumentar o tamanho dos agregados, com a distribuição entre as classes tendendo a diminuir.

Quando se compara as proporções dos agregados na classe 1 em função apenas do tamanho dos agregados, nota-se que ocorrem aumentos maiores nos valores dos diâmetros de agregados (Figura 15). Esse comportamento é esperado, em vista que, na via úmida, é aplicada maior força para promover a ruptura dos agregados. Neste sentido, quanto maior seu diâmetro mais resistência a essa força será registrada, e a permanência de agregados nas peneiras superiores é um indicativo de uma boa estruturação (SILVA; MIELNICZUK, 1998).

4.4. Diâmetro médio ponderado (DMP)

Conforme foi observado na Tabela 4, os valores do DMP foram maiores em ambiente de mata nativa, enquanto em que nos ambientes de cana, com e sem queima, os valores foram relativamente iguais.

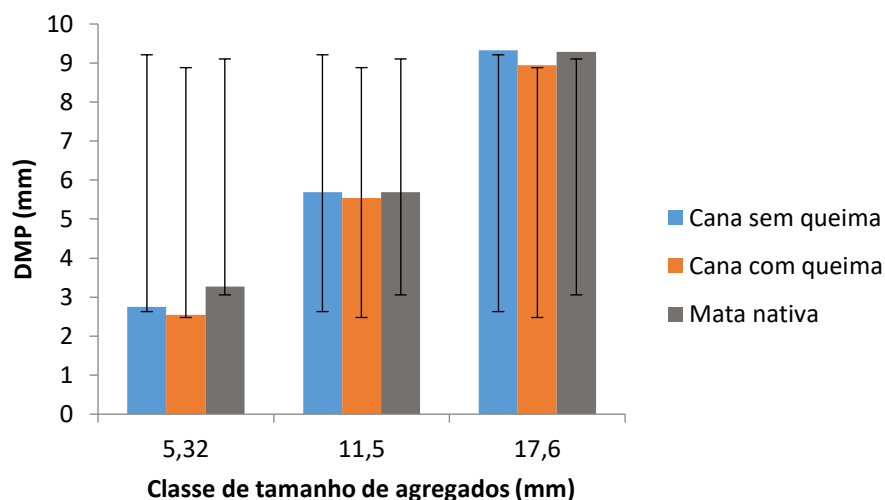
Entretanto, ao se observar a Tabela 4, nota-se que com o aumento na dimensão dos agregados, mesmo em se tratando de solos mais arenosos, os valores do DMP tendem a aumentar (DEMARCHI; PERUSI; PIROLI, 2012), chegando a valores muito próximos entre a área em cana crua e mata nativa. Por outro lado, os valores de DMP em ambiente sob a queima foram piores quando comparados aos demais tratamentos, como também visto na Figura 16.

Tabela 4 - Relação entre as médias de cada agregados em função do tipo de tratamento

Øeq.	DMP			CV
	C/SQ	C/Q	Mata	
	(mm)			(%)
5,32	2,75Bb	2,55Bb	3,27Aa	13
11,50	5,69Aa	5,54Bab	5,69ABa	2
17,60	9,32Aa	8,95Ab	9,28Aa	2

DMP = diâmetro médio ponderado. C/SQ = cana crua queima. C/Q = cana sob queima. As letras indicam as diferenças entre os tratamentos no teste de Tukey a 5%, onde as minúsculas comparam os resultados em função do aumento do tamanho do agregado mesma linha; e as maiúsculas, em função do tipo de tratamento.

Figura 16 – Diâmetro médio ponderado dos agregados em função do aumento de tamanho das classes.



4.5. Diâmetro médio geométrico (DMG)

Os valores do DMG dos solos tiveram aumentos significativos com o aumento na dimensão do agregado (Tabela 6), estando de acordo com a literatura, demonstrando que as classes de agregados maiores tendem a aumentar quando os ensaios foram realizados em agregados de dimensões maiores, mesmo sendo em via úmida.

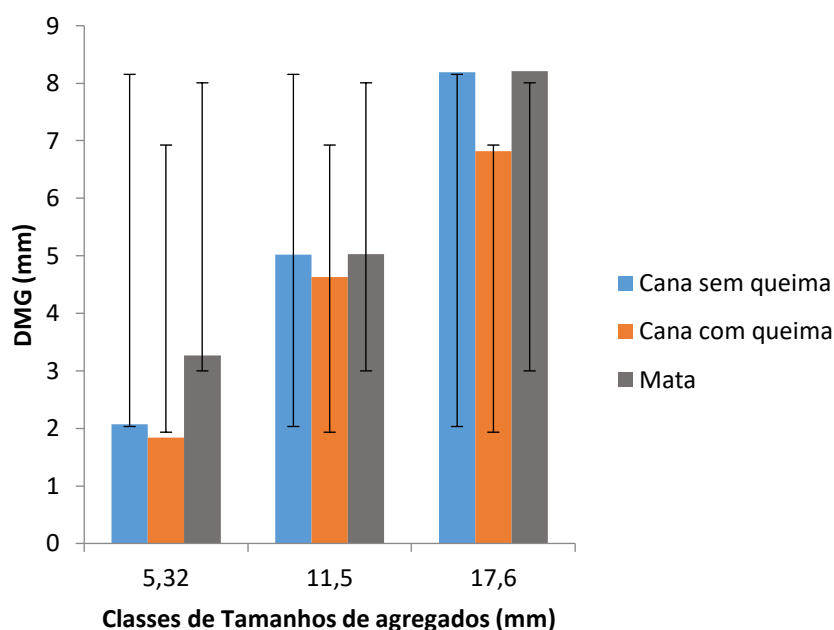
Também foram observadas mudanças não significativas, principalmente entre os resultados do DMG sob mata e cana crua (BRIZZI et al., 2019; NOURI et al., 2012), mesmo em função do aumento do tamanho; porém, quando comparado à área sob queima, os valores foram menores em relação às demais áreas, principalmente para os agregados menores, medindo 5,32 mm de \varnothing_{eq} (Tabela 5; Figura 17). Mesmo sendo solos arenosos, os valores de DMG foram altos nos ambientes do estudo, principalmente para agregados com \varnothing_{eq} entre 11,5 e 17,6 mm. Os fatores da baixa diferença entre os DMG para o ambiente sob mata nativa e cana crua, demonstram que mesmo em um canal relativamente novo (cinco anos) o processo de queima já ocasiona pequenas mudanças estruturais, para alguns índices de agregação do solo, principalmente em agregados maiores.

Tabela 5 - Relação entre as médias de cada agregados em função do tipo de tratamento

\varnothing_{eq} (mm)	DMG (mm)			CV (%)
	C/SQ	C/Q	Mata	
5,32	2,07Bb	1,84Cb	3,27Aa	32,1
11,50	5,02Aa	4,63Bb	5,03Aa	4,7
17,60	8,19Ab	6,82Bb	8,21Aa	10,3

DMG = diâmetro médio geométrico, C/SQ = cana crua sem queima, C/Q = cana sob queima. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. As letras indicam as diferenças entre os tratamentos no teste de Tukey a 5%, onde as minúsculas comparam os resultados em função do aumento do tamanho do agregado mesma linha; e as maiúsculas, em função do tipo de tratamento.

Figura 17 - Representação gráfica do diâmetro médio geométrico em relação aos diferentes tamanhos de agregados



4.6. Índice geral de estabilidade de agregados (IGEA) e AGRI

O índice geral de estabilidade de agregados (IGEA) demonstrou que a proporção de agregados < 0,25 mm é baixa e, conseqüentemente, o solo apresenta boa agregação, com valores acima de 92% (Tabela 6), sendo os agentes mais atuantes para essa agregação a matéria orgânica do solo (MOS) e, principalmente, as raízes das plantas (OADES, 1984), como visto na Figura 18.

Tabela 6 - Índice geral de estabilidade de agregados em função do tipo de manejo adotado na pesquisa

Øeq. — (mm) —	IGEA			CV (%)
	C/SQ	C/Q	Mata	
	(%)			
5,32	95,50B	92,30B	97,90A	3,0
11,50	97,60A	96,94AB	98,23A	0,7
17,60	98,70A	96,82B	97,92AB	1,0

Øeq. = diâmetro equivalente dos agregados; IGEA = índice geral de estabilidade de agregados, C/SQ = cana crua sem queima, C/Q = cana sob queima. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Figura 18 – Bloco de solo ilustrando a grande quantidade de raízes finas e médias, responsáveis pela manutenção da estrutura do solo



Fonte: Arquivo pessoal

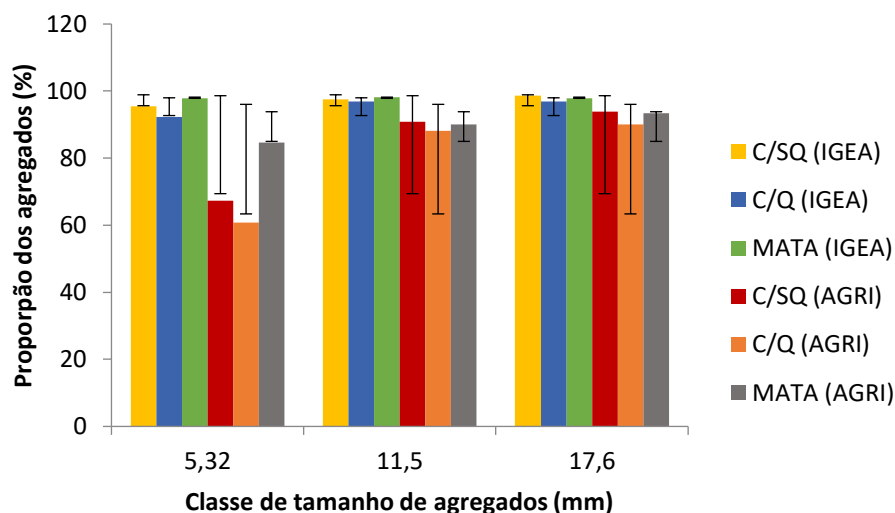
Já a para os valores do índice AGRI, que representam a proporção daqueles agregados > 2 mm, os seus valores (Tabela 9) tiveram a mesma tendência dos IGEA (Figura 19), apesar dos valores desse último serem maiores. Nota-se que, quando os ensaios são realizados com agregados de dimensões maiores que o padrão (5,32 mm), esses índices são mais altos, principalmente, para agregados com \varnothing_{eq} medindo 17,6 mm. Esses resultados indicam melhor estruturação do solo, principalmente em ambientes com manejo sob cana crua (SILVA; MIELNICZUK, 1998).

Tabela 7 - Índice AGRI em função do tipo de manejo adotado na pesquisa

\varnothing_{eq} — (mm) —	AGRI			CV (%)
	C/SQ	C/Q (%)	Mata	
5,32	67,24B	60,87B	84,69A	17,4
11,50	90,93A	88,16B	90,12A	1,6
17,60	93,88A	90,09AB	93,45B	2,2

\varnothing_{eq} = diâmetro equivalente dos agregados; AGRI = proporção de agregados > 2 mm, C/SQ= cana crua sem queima, C/Q = cana sob queima. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Figura 19 – Relação entre o índice AGRI e o índice geral de estabilidade de agregados-IGEA sendo C/SQ = cana sem queima e C/Q = cana com queima



Diante do exposto pode-se concluir que relação entre o AGRI e o IGEA (Figura 19) demonstrou que quanto maior as dimensões dos agregados, maior sua estruturação, estado esses achados de acordo com a literatura. Outro fato importante diz respeito a textura dos solos, onde, mesmo sendo mais arenosos os agentes mais atuantes da agregação foram o sistema radicular e a matéria orgânica (BRONICK; LAL, 2005), já que ambos os índices se demonstraram ligeiramente maior em ambientes sem a queima.

4.7. Resistência tênsil dos agregados dos solos (RT)

Os valores de RT diminuíram com o aumento do tamanho do agregado, em decorrência da maior dispersão da força de quebra, quando em agregados maiores (BLANCO-CANQUI; LAL, 2006; DEXTER; WATTS, 2000). Devido a esse fator, ficou visível que o aumento da classe de agregados ocasiona, não necessariamente, aumento da força necessária para ruptura do agregado (Tabela 8).

Tabela 8 - Tabela demonstrativa da análise dos dados da RT para os agregados com diâmetro equivalente ($\varnothing_{eq.}$) de 22 mm e 44 mm

$\varnothing_{eq.}$ (mm)	RT (kPa)			CV (%)
	C/SQ	C/Q	Mata	
22	0,35 Ba	0,17 Ca	0,47 A	45
44	0,13 Ab	0,12 Aa	S/P	85

RT = resistência tênsil, C/SQ = cana crua, C/Q = cana sob queima, S/P = sem possibilidade de medição (força máxima de ruptura do agregado > 20 kgf). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Para os agregados com \varnothing_{eq} iguais a 22 mm, quando analisados em função dos tratamentos, os da área de mata nativa e cana sob colheita crua apresentaram maiores valores quando comparados aos da área de cana com queima (HILLEL, 2003). Porém, ao aumentar o \varnothing_{eq} do agregado para 44 mm, não foram observadas diferenças entre as áreas (Tabela 8), exceto para a área de mata, por causa da limitação do penetrômetro em relação à sua célula de carga, comentados a seguir. Na área de mata nativa, não foi possível finalizar os ensaios utilizando agregados com 44 mm, pois a sua força de ruptura ultrapassou o limite de segurança do penetrômetro, que tem da carga nominal de 20 kgf, e, portanto, devendo-se desligar a célula de carga antes, nesse caso, entre 16 e 18 kgf.

Em relação à comparação entre os resultados de RT, em função do tamanho do agregado, observa-se que aqueles da área de cana crua apresentaram diminuição nos valores com o aumento do \varnothing_{eq} dos agregados (0,35 para 0,13 kPa, Tabela 8), como também constatado por Blanco-Canqui e Lal (2006) e Dexter e Watts (2000). Esses autores observaram que a força para ruptura dos agregados diminui com o aumento do seu tamanho (\varnothing_{eq}). Por outro lado, para os agregados da área de cana queimada, não houve diferenças entre as RT determinadas nos dois \varnothing_{eq} (22 e 44 mm). Esse fato pode ser justificado pelos efeitos da queima na matéria orgânica do solo dessa área. De fato, a diminuição do carbono orgânico, que é o principal agente de cimentação do solo, diminui a agregação e, conseqüentemente, reduz o processo de estruturação (STUMPF et al., 2018). Assim, para \varnothing_{eq} maiores que 22 mm, pode-se especular que a estrutura mais estável será encontrada em ambiente de mata nativa, com valores de RT menores que as demais áreas.

4.8. Porosidade total (PT) e distribuição do tamanho de poros (DTP)

Os valores de PT comprovam que na região de mata nativa se obtêm os maiores índices de porosidade e sua distribuição em classes de tamanho de poros (DTP), como mostra a Tabela 9. Entretanto, entre as classes de poros, os macroporos foram os que apresentaram os menores valores, entrando em desconcreto com o citado por Prevedello e Armindo (2015), principalmente na área sob queima (3,50%), sendo que grande parte desses macroporos são criados pelo sistema radicular das plantas, ou passagem de seres vivos que caminham pela parte mais superficial dos solos estudados (Figura 20).

Quando comparado à DTP entre os manejos avaliados, a área de mata nativa se apresentou com os maiores quantitativos das classes de poros, seguida da região sem queima. Apesar da área sob processo de queima apresentar o menor valor de PT (36,50%), observa-se um aumento da sua mesoporosidade (9,50%) em relação à macroporosidade da área sem

queima (8,63%) (CHERUBIN et al., 2016). Entretanto, em relação à microporosidade, a área sob queima voltou a apresentar os menores valores (23,50%), quando comparada com as demais áreas (Tabela 9).

Tabela 9 - Porosidade do solo (PT) e suas classes de poros em relação aos tipos de manejo utilizados no estudo

Atributo	Mata Nativa	Método de Colheita		Redução em relação à Mata Nativa	
		Queima	Crua	Queima	Crua
				%	
PT	45,66 A	36,56 C	38,16 B	19,93	16,43
Macroporos	5,20 A	3,55 C	4,74 B	31,73	8,85
Mesoporos	9,82 A	9,50 B	8,63 C	3,26	12,12
Microporos	30,64 A	23,14 C	24,79 B	24,48	19,09
θ_{cc}	26,75 A	10,14 C	17,77 B	62,09	33,57

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Figura 20 - Macroporo biológico gerado no solo por ação dos organismos vivos.



Fonte: Arquivo pessoal do Autor

4.9. Volume elementar representativo (VER)

Com base nos ensaios para determinação da RT e IEA comentados anteriormente, verificou-se que os IEA, quando determinados em tamanhos com \varnothing_{eq} de 5,32 e 11,5 mm, apresentam mudanças pouco significativas. Com o aumento do \varnothing_{eq} para 17,6 mm as diferenças passaram a ser não significativas em relação à dimensão anterior. Desse modo, o VER para os ensaios dos IEA foi definido como $\leq 5,32$ mm, especialmente para o índice geral de estabilidade de agregados (IGEA) dos solos estudados. Assim, para a determinação do valor do VER mais exato, sugere-se, para esses solos, que os ensaios sejam realizados com agregados medindo $\varnothing_{eq} < 5,32$ mm (VIK et al., 2013; GERKE, 2020).

O número de agregados utilizados nos ensaios tende a cair ao se aumentar sua dimensão. Assim, para um mesmo peso de agregados (25 g, por exemplo), foi observado que,

aqueles de menor \varnothing_{eq} (5,32 mm) apresentavam um maior número de agregados, quando comparados com aqueles com \varnothing_{eq} maiores (11,5 e 17,6 mm). Esse fato poderá interferir na representatividade da amostra para esses maiores agregados. Assim, como sugestão, serão necessários mais estudos sobre o efeito do aumento do número de agregados nos ensaios para dimensões maiores dos agregados previamente definidos.

Já para a resistência tênsil de agregados (RT), aqueles com \varnothing_{eq} de 22 mm, quando em comparação aos de 44 mm, demonstraram diferenças significantes em relação à força máxima de ruptura (Tabela 8). Assim, como observado para a definição do VER para os ensaios dos IEA, o VER para os ensaios de RT foi definido como $\varnothing_{eq} = 22$ mm, uma vez que, pelos problemas de limitação da célula de carga comentados anteriormente, não foi possível, de forma completa, comparar estatisticamente os resultados da RT entre os \varnothing_{eq} testados.

4.10. Análises químicas dos solos

Dentro das análises de caracterização química, o carbono orgânico total do solo (COT) foi decisivo para confirmar os efeitos negativos da queima da matéria orgânica do solo, uma vez que o ambiente que sofre o processo de queima apresentou os menores teores de COT (Tabela 10), devido às perdas desse material sob altas temperaturas (SOUZA, 2005; BRAIDA et al., 2010), ocasionando menor agregação no solo nesse ambiente, como foi previamente comentado.

Tabela 10 - Atributos químicos utilizados para a caracterização das amostras das áreas em estudo, sob cultivo de cana-de-açúcar.

Área	COT (g kg ⁻¹)	C.V. (%)
C/SQ	36,56A	3,25
C/Q	23,33 B	2,60
Mata	32,75A	9,59

COT = Teor de carbono orgânico total do solo. C/SQ = cana sem queima. C/Q = cana com queima

4.11. Coeficiente de correlação de Pearson e índice de qualidade do solo (IQS)

As correlações entre os índices de agregação (IGEA, AGRI, DMP, DMG e RT) para a área de cana crua podem ser encontradas, em relação aos diferentes tamanhos de agregados (5,32; 11,5 e 17,6 mm), nas Tabelas 11, 12 e 13, respectivamente. Observa-se que houve relação positiva e crescente do DMP em relação à variável PT; já para RT foi observado o inverso, demonstrando relação negativa entre esses índices (UTOMO; DEXTER, 1981), porém não ocorreu significância em nenhuma das correlações. Já o IGEA e o DMP

demonstraram significância positiva e significativa em agregados maiores, quando comparados com a densidade do solo (DS).

Tabela 11 - Coeficientes de correlação de Pearson para a área de cana sem queima utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 5,32$ mm (IEA) e 22 mm (RT).

Variáveis	DMP	DMG	AGRI	IGEA	RT
	(5,32 mm)				(22 mm)
Areia	0,014	0,032	0,035	0,002	-0,059
Argila	0,005	0,026	0,026	0,000	0,036
Silte	0,069	0,003	0,020	0,094	-0,169
ADA	0,003	0,025	0,019	0,001	0,054
GF	0,029	0,053	0,032	0,022	-0,240
Ds	0,243	0,016	0,220	0,130	0,097
PT	0,000	0,031	0,001	0,245	-0,038
Macro	0,000	0,031	0,001	0,245	-0,038
Meso	0,000	0,031	0,001	0,245	-0,038
Micro	0,000	0,031	0,001	0,245	-0,038
COT	0,014	0,233	0,103	0,018	0,480

ADA: Argila dispersa em água; GF: Grau de floculação; Ds: Densidade do solo; COT: Carbono orgânico; Macro: macroporosidade; Meso: mesoporosidade; Micro: microporosidade; PT: porosidade total. Os valores seguidos de * indicam a ocorrência de correlação significativa a 5%.

Tabela 12- Coeficientes de correlação de Pearson para a área de cana sem queima utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 11,5$ mm (IEA) e 22 mm (RT).

Variáveis	DMP	DMG	AGRI	IGEA	RT
	(11,5 mm)				(22 mm)
Areia	0,006	0,002	0,086	0,002	-0,059
Argila	0,000	0,000	0,149	0,001	0,036
Silte	0,010	0,001	0,183	0,007	-0,169
ADA	0,000	0,001	0,146	0,001	0,054
GF	0,001	0,073	0,032	0,004	-0,240
Ds	0,601*	0,525	0,202	0,560	0,097
PT	0,147	0,081	0,026	0,135	-0,038
Macro	0,147	0,081	0,026	0,135	-0,038
Meso	0,147	0,081	0,026	0,135	-0,038
Micro	0,147	0,081	0,026	0,135	-0,038
COT	0,032	0,037	0,103	0,066	0,480

ADA: Argila dispersa em água; GF: Grau de floculação; Ds: Densidade do solo; COT: Carbono orgânico; Macro: macroporosidade; Meso: mesoporosidade; Micro: microporosidade; PT: porosidade total. Os valores seguidos de * indicam a ocorrência de correlação significativa a 5%.

Os índices de DMG e IGEA apresentaram relação direta com a densidade do solo (Ds); essa relação positiva demonstra que um índice está diretamente associado ao outro, de forma que ao se aumentar a Ds também se aumenta o IEA dos solos estudados.

Tabela 13- Coeficientes de correlação de Pearson para a área de cana sem queima utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 17,6$ mm (IEA) e 22 mm (RT).

Variáveis	DMP	DMG	AGRI	IGEA	RT
	(17,6 mm)				(22 mm)
Areia	0,000	0,066	0,006	0,036	-0,059
Argila	0,001	0,113	0,000	0,015	0,036
Silte	0,068	0,115	0,011	0,002	-0,169
ADA	0,001	0,101	0,000	0,014	0,054
GF	0,091	0,000	0,102	0,004	-0,240
Ds	0,147	0,012	0,319	0,596*	0,097
PT	0,118	0,003	0,016	0,300	-0,038
Macro	0,118	0,003	0,016	0,300	-0,038
Meso	0,118	0,003	0,016	0,300	-0,038
Micro	0,118	0,003	0,016	0,300	-0,038
COT	0,109	0,113	0,011	0,046	0,480

ADA: Argila dispersa em água; GF: Grau de floculação; Ds: Densidade do solo; COT: Carbono orgânico; Macro: macroporosidade; Meso: mesoporosidade; Micro: microporosidade; PT: porosidade total. Os valores seguidos de * indicam a ocorrência de correlação significativa a 5%.

As correlações entre os índices de agregação (IGEA, AGRI, DMP, DMG e RT) para a área de cana sob o processo de queima, podem ser encontradas nas Tabelas 14, 15 e 16, em relação aos diferentes tamanhos de agregados (5,32; 11,5 e 17,6 mm), respectivamente. Diferente ao observado para a área sob colheita da cana crua, observa-se que na área sob queima houve relação positiva e significativa do DMP e DMG em relação a ADA em agregados maiores, demonstrando uma relação de baixa estruturação em comparação a área sob cana crua, e uma maior atividade da argila quando dispersa.

Tabela 14 - Coeficientes de correlação de Pearson para a área de cana com queima utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 5,32$ mm (IEA) e 22 mm (RT).

Variáveis	DMP	DMG	AGRI	IGEA	RT
	(5,32 mm)				(22 mm)
Areia	-0,207	-0,285	-0,729	0,065	-0,135
Argila	-0,185	-0,029	0,018	-0,011	0,066
Silte	-0,077	0,163	-0,466	0,002	-0,473
ADA	0,112	-0,210	-0,098	0,008	0,502
GF	-0,172	0,193	0,100	-0,012	-0,510
Ds	0,235	0,284	0,319	-0,127	-0,224
PT	-0,157	-0,464	-0,334	-0,372	-0,106
Macro	-0,157	-0,464	-0,334	-0,372	-0,106
Meso	-0,157	-0,464	-0,334	-0,372	-0,106
Micro	-0,157	-0,464	-0,334	-0,372	-0,106
COT	-0,471	0,056	-0,132	-0,361	0,120

ADA: Argila dispersa em água; GF: Grau de floculação; Ds: Densidade do solo; COT: Carbono orgânico; Macro: macroporosidade; Meso: mesoporosidade; Micro: microporosidade; PT: porosidade total. Os valores seguidos de * indicam a ocorrência de correlação significativa a 5%.

Tabela 15 - Coeficientes de correlação de Pearson para a área de cana com queima utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 11,5$ mm (IEA) e 22 mm (RT).

Variáveis	DMP	DMG	AGRI	IGEA	RT
	(11,5 mm)				(22 mm)
Areia	-0,421	0,018	-0,607	-0,376	-0,135
Argila	0,275	0,095	0,307	0,063	0,066
Silte	-0,499	-0,129	-0,184	-0,477	-0,473
ADA	0,712*	0,621*	0,218	0,414	0,502
GF	-0,595	-0,568	-0,104	-0,380	-0,510
Ds	0,391	-0,153	0,455	0,029	-0,224
PT	-0,219	0,039	-0,383	-0,081	-0,106
Macro	-0,219	0,039	-0,383	-0,081	-0,106
Meso	-0,219	0,039	-0,383	-0,081	-0,106
Micro	-0,219	0,039	-0,383	-0,081	-0,106
COT	-0,141	0,145	-0,138	-0,118	0,120

ADA: Argila dispersa em água; GF: Grau de floculação; Ds: Densidade do solo; COT: Carbono orgânico; Macro: macroporosidade; Meso: mesoporosidade; Micro: microporosidade; PT: porosidade total. Os valores seguidos de * indicam a ocorrência de correlação significativa a 5%.

Tabela 16 - Coeficientes de correlação de Pearson para a área de cana com queima utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 17,6$ mm (IEA) e 22 mm (RT).

Variáveis	DMP	DMG	AGRI	IGEA	RT
	(17,6 mm)				(22 mm)
Areia	-0,248	-0,191	-0,445	-0,245	-0,135
Argila	0,350	-0,158	-0,035	0,062	0,066
Silte	-0,026	-0,422	-0,359	-0,169	-0,473
ADA	0,641*	0,301	0,519	0,336	0,502
GF	-0,500	-0,347	-0,515	-0,304	-0,510
Ds	0,307	-0,070	0,146	-0,185	-0,224
PT	0,155	0,221	0,152	0,112	-0,106
Macro	0,155	0,221	0,152	0,112	-0,106
Meso	0,155	0,221	0,152	0,112	-0,106
Micro	0,155	0,221	0,152	0,112	-0,106
COT	0,102	-0,493	-0,233	0,138	-0,135

ADA: Argila dispersa em água; GF: Grau de floculação; Ds: Densidade do solo; COT: Carbono orgânico; Macro: macroporosidade; Meso: mesoporosidade; Micro: microporosidade; PT: porosidade total. Os valores seguidos de * indicam a ocorrência de correlação significativa a 5%.

As correlações entre os índices de agregação (IGEA, AGRI, DMP, DMG e RT) para a área de mata nativa podem ser encontradas nas Tabelas 17, 18 e 19, em relação aos diferentes tamanhos de agregados (5,32; 11,5 e 17,6 mm), respectivamente. A área de mata nativa apresentou os melhores índices com correlações negativas, e significativas, para a RT e porosidade, mostrando que a baixa distribuição das classes de poros (macro, meso e microporosidade) ocasiona a diminuição na agregação do solo, ocorrendo esse fenômeno para os variados tamanhos de agregados utilizados como visto por Zhang (1994) e Hillel (2003).

Tabela 17 - Coeficientes de correlação de Pearson para a área de mata nativa utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 5,32$ mm (IEA) e 22 mm (RT)

Variáveis	DMP	DMG	AGRI	IGEA	RT
	(5,32 mm)				(22 mm)
Areia	0,045	-0,439	-0,249	-0,125	0,176
Argila	-0,008	0,668*	0,246	0,367	0,153
Silte	-0,031	0,156	-0,191	-0,210	-0,408
ADA	0,231	0,629*	-0,125	0,094	-0,074
GF	-0,285	-0,200	-0,253	-0,062	0,232
Ds	0,110	-0,405*	-0,195	0,043	0,164
PT	0,398	0,141	0,534	-0,543	-0,703*
Macro	0,401	0,117	0,498	-0,474	-0,684*
Meso	0,400	0,113	0,492	-0,464	-0,682*
Micro	0,413	0,119	0,501	-0,470	-0,678*
COT	0,016	0,324	-0,343	0,327	0,527

ADA: Argila dispersa em água; GF: Grau de floculação; Ds: Densidade do solo; COT: Carbono orgânico; Macro: macroporosidade; Meso: mesoporosidade; Micro: microporosidade; PT: porosidade total. Os valores seguidos de * indicam a ocorrência de correlação significativa a 5%.

Tabela 18 - Coeficientes de correlação de Pearson para a área de mata nativa utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 11,5$ mm (IEA) e 22 mm (RT).

Variáveis	DMP	DMG	AGRI	IGEA	RT
	(11,5 mm)				(22 mm)
Areia	-0,268	0,055	-0,295	-0,033	0,176
Argila	0,249	-0,096	0,103	-0,068	0,153
Silte	0,122	0,236	-0,318	0,320	-0,408
ADA	0,291	0,091	0,060	0,006	-0,074
GF	0,425	0,173	-0,161	0,402	0,232
Ds	-0,405	0,226	-0,303	0,080	0,164
PT	-0,258	0,377	0,190	-0,255	-0,703*
Macro	-0,324	0,334	0,197	-0,255	-0,684*
Meso	-0,332	0,328	0,199	-0,255	-0,682*
Micro	-0,333	0,332	0,181	-0,260	-0,678*
COT	0,313	-0,248	0,051	-0,108	0,527

ADA: Argila dispersa em água; GF: Grau de floculação; Ds: Densidade do solo; COT: Carbono orgânico; Macro: macroporosidade; Meso: mesoporosidade; Micro: microporosidade; PT: porosidade total. Os valores seguidos de * indicam a ocorrência de correlação significativa a 5%.

O solo apresentou um fator principal de agregação que foi o sistema radicular da cana-de-açúcar; apesar dos resultados dos ensaios de estabilidade de agregados mostrarem que o solo estava bem agregado, as correlações com os atributos com capacidade de agregar o solo (argila e matéria orgânica) foram fracas em alguns casos, principalmente na área de manejo sob queima.

Tabela 19 - Coeficientes de correlação de Pearson para a área de mata nativa utilizando os parâmetros analisados nas amostras com $\varnothing_{eq} = 17,6$ mm (IEA) e 22 mm (RT)

Variáveis	DMP	DMG	AGRI	IGEA	RT
	(17,6 mm)				(22 mm)
Areia	-0,277	0,258	-0,376	-0,556	0,176
Argila	0,552	-0,181	0,606	0,622	0,153
Silte	-0,117	0,158	0,061	0,083	-0,408
ADA	0,075	0,042	0,198	0,200	-0,074
GF	0,111	0,100	-0,063	0,221	0,232
Ds	-0,409	-0,189	-0,529	-0,598	0,164
PT	-0,439	-0,361	-0,373	-0,213	-0,703*
Macro	-0,452	-0,367	-0,372	-0,249	-0,684*
Meso	-0,452	-0,367	-0,371	-0,252	-0,682*
Micro	-0,460	-0,370	-0,379	-0,263	-0,678*
COT	-0,127	0,270	0,039	-0,259	0,527

ADA: Argila dispersa em água; GF: Grau de floculação; Ds: Densidade do solo; COT: Carbono orgânico; Macro: macroporosidade; Meso: mesoporosidade; Micro: microporosidade; PT: porosidade total. Os valores seguidos de * indicam a ocorrência de correlação significativa a 5%.

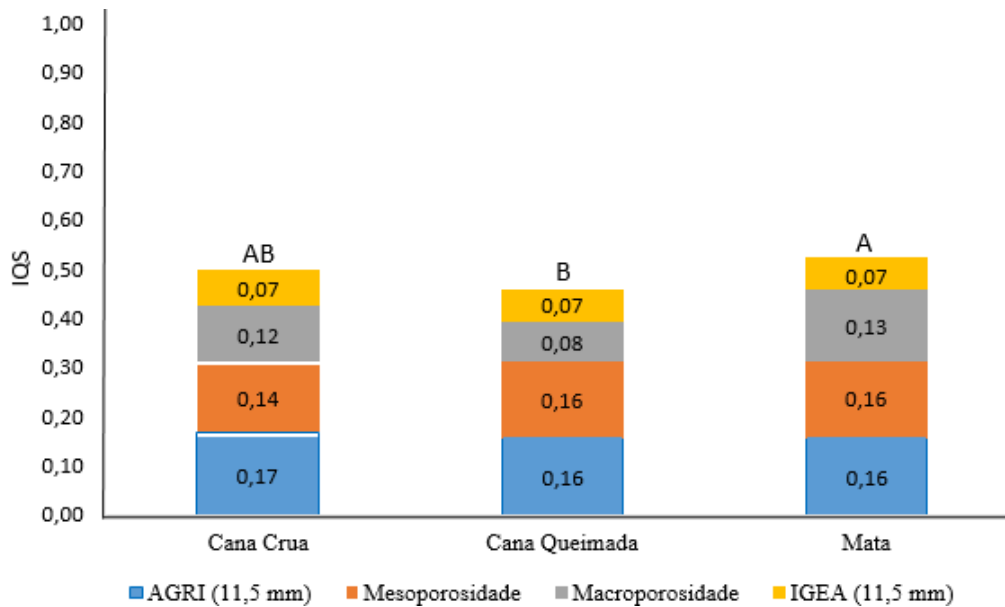
A queima causa alterações estruturais no solo mesmo que em um curto período, como no caso do presente trabalho (cinco anos), e essa queima em frequências maiores irá ocasionar mudanças estruturais mais amplas, interferindo na qualidade do solo e, conseqüentemente, na sua produtividade.

Em relação ao índice de qualidade do solo (IQS), este foi gerado a partir de uma relação não linear, devido a um uso maior de variáveis e valores mais representativos, conforme ilustra a Figura 21.

Conforme já verificado pelos outros índices e comentários anteriores, os valores do IQS apontam que a área de mata tem melhores índices de estabilidade da estrutura do solo, corroborando com os trabalhos de Rabot et al. (2018) e Six e Paustian (2014), apresentando maiores valores em relação à área sob queima e sendo semelhante à área sob colheita da cana crua (TENELLI, 2019; CASTIONI et al., 2019; BLAIR, 2002), que também apresentou melhores índices em relação a área de cana sob queima (Figura 22).

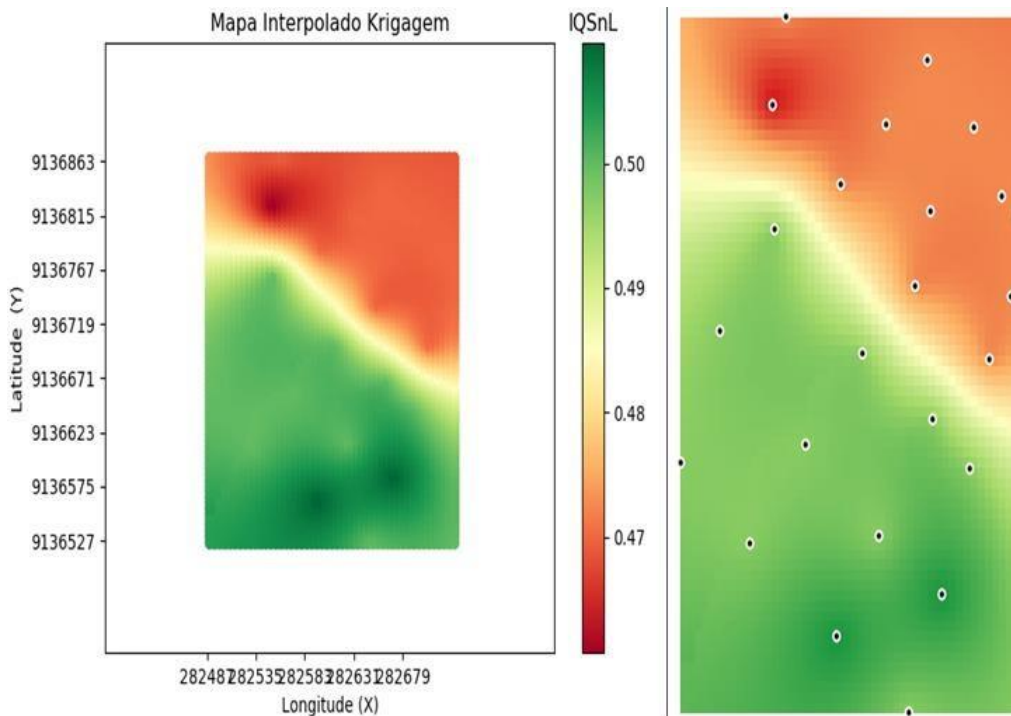
Observa-se também que, entre os quatro índices utilizados para a construção do IQS, o IGEA e a macroporosidade tiveram menor participação, sendo as maiores registradas para o AGRI e a mesoporosidade.

Figura 21 - Índice de qualidade do solo gerado por regressão não linear, utilizando os valores do AGRI e do IGEA, além da macro e mesoporosidade.



IQS: índice de qualidade do solo; IGEA: índice geral de estabilidade de agregados.

Figura 22- Mapa de krigagem dos dados de qualidade do solo em função dos pontos de coleta.



Diante desses resultados, pode-se concluir que o IQS corrobora os achados dos demais atributos avaliados na pesquisa, que comprovam a diminuição da qualidade estrutural em função do manejo sob cana colhida após a queima do canavial.

5. CONCLUSÕES

A colheita em ambientes sob queima, mesmo em uma escala de tempo curta (cinco anos), promoveu mudanças negativas na qualidade estrutural do solo em comparação às outras áreas. Esse fator deve-se a perda de cobertura em sua superfície e, conseqüentemente, à diminuição de variáveis que causam agregação no solo, como MOS ou sistema radiculares das plantas, comprovando assim a primeira hipótese da pesquisa.

O volume elementar representativo (VER), caracterizado pelo diâmetro do agregado, foi definido como sendo $\leq 5,32$ mm, para os ensaios dos índices de estabilidade de agregados do solo (DMP, DMG e IGEA); e igual a 22 mm, para os ensaios de resistência tênsil de agregados do solo (RT), comprovando a segunda hipótese da pesquisa.

Correlações significativas e positivas ocorreram entre o DMP e a ADA; já para a RT as relações significativas e negativas foram com os índices de porosidade (PT, macroporosidade, mesoporosidade e microporosidade), indicando que na área de estudo o agente cimentante mais influente é a argila, enquanto a MOS, apesar de maiores teores na área de mata e cana crua, não teve correlação com os índices estruturais estudados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDINSOFT (2023). XLSTAT statistical and data analysis solution. New York, USA. <https://www.xlstat.com>

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMAS (APAC). **Histórico de Chuvas**. Disponível em: <<https://www.apac.pe.gov.br/>>. Acesso em: 16 dez. 2021.

ALCAÑIZ, M., OUTEIRO, L., FRANCOS, M., ÚBEDA, X. Effects of prescribed fires on soil properties: a review. **Science of the Total Environment**. v. 613-614, p. 955–957. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.144>.

ALMEIDA, B. G. Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo. 2008. 103 f. **Tese de Doutorado – ESALQ/USP**, Piracicaba-SP, 2008.

ALMEIDA, B. G.; FREITAS, P. L.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M.; DONAGEMMA, G. K. Porosidade. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017a. p. 82-94. ISBN: 978-85-7035-771-7.

ALMEIDA, B. G.; VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Densidade do solo. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília-DF: Embrapa, 2017b. cap. 7, p. 65-75.

AMÉZKETA, E. Soil Aggregate Stability: A Review. **Journal of Sustainable Agriculture**, v. 14, n. 2, p. 83–151, 1999. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08

- ANDRADE-LIMA, D. 1960. Estudos fitogeográficos de Pernambuco. **Arquivos do Instituto de Pesquisas Agronômicas** 5: 305-341. <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/apca/article/view/47>
- ARCENEGUI, V., JIMÉNEZ-MORILLO, N.T., JIMÉNEZ-PINILLA, P., 2019. Soil water repellency. In: PEREIRA, P., MATAIX-SOLERA, J., ÚBEDA, X., REIN, G., CERDÀ, A. (Eds.), **Fire Effects on Soil Properties**. CSIRO Publishing, pp. 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2010.09.002>
- BADÍA, D., MARTI, C., 2019. Texture, mineralogy and structure. In: PEREIRA, P., MATAIX-SOLERA, J., ÚBEDA, X., REIN, G., CERDÀ, A. (Eds.), **Fire Effects on Soil Properties**. CSIRO Publishing, pp. 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2010.09.002>
- BADÍA-VILLAS, D., GONZÁLEZ-PÉREZ, J.A., AZNAR, J.M., ARJONA-GRACIA, B., MARTÍ-DALMAU, C. Changes in water repellency, aggregation and organic matter of a mollic horizon burned in laboratory: soil depth affected by fire. **Geoderma** 213, 400–407. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.038>
- BARBOSA, L. C.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O; CHERUBIN, M. R; CASTIONI, G. A. F; TENELLI, S; FRANCO, H. C. J; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 195, p. 1-11, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104383>
- BARREIRO, A.; MARTIN, A.; CARBALLAS, T.; DÍAZ-RAVIÑA, M. Response of soil microbial communities to fire and fire-fighting chemicals. **Science of the Total Environment**, v. 408, p. 6172-6178, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.09.011>
- BARROS, P.A.; PEDROSA, E.M.R.; CARDOSO, S.O.M.; MONTEIRO, M.R. Relationship between soil organic matter and nematodes in sugarcane fields. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38 (2), p. 551-559. 2017. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil
- BARROS, R. P.; VIÉGAS, P. R. A.; SILVA, T. L.; SOUZA, R. M.; BARBOSA, L.; VIÉGAS, R. A.; BARRETTO, M. C. V.; MELO, A. S. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 3, p. 341–346, 2010. <https://revistas.ufg.br/pat/article/view/6422>.
- BEAR, J. Dynamics of fluid in porous media. **Soil Science**, v 120 (2), p. 162-163. Nova Iorque, 1975.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n.1, p. 155–163, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100015>
- BLAIR, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia, **Soil and Tillage Research**, v. 55, p. 183-191, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00113-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00113-6)
- BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Aggregates: tensile strength. In: LAL, R. (Ed.). **Encyclopedia of soil science**. 2 ed. New York: Taylor & Francis Group, 2006. v.1, p. 45-48.
- BOIX-FAYOS, C.; CALVO-CASES, A.; IMESON, A. C.; SORIANO-SOTO, M. D. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of

aggregate size and stability as land degradation indicators. **CATENA**, v. 44, n. 1, p. 47–67, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00176-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00176-4)

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. Nature and properties of soils. **Prentice-Hall**, Inc., New Jersey, 2001.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.; VEIGA, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.2, p.131–139, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000200003>

BRIZZI, R. R.; PORTOCARRERO, H.; SOUZA, A. P.; COSTA, A. J. S. T.; RANGEL, L. A. Avaliação macro e microestrutural de solos sob diferentes usos a partir de análises físicas, microscopia eletrônica e espectroscopia por energia dispersiva. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 46, n. 1, p. 25–40, 2019. <https://doi.org/10.5380/raega.v46i1.53023>

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1, p. 3–22, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G. D.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; GROENIGEN, J. W. V.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>

CARRIZO, M. E.; ALESSO, C. A.; COSENTINO, D.; IMHOFF, S. Aggregation agents and structural stability in soils with different texture and organic carbon contents. **Scientia Agricola**, v. 72, n.1, p. 75–82, 2015. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0026>

CARRIZO, M.E.; ALESSO, C.A.; SOARES FRANCO, H.H.; BERNABÉ FERREIRA, C.J.; IMHOFF, S. Tensile strength of mollisols of contrasting texture under influence of plant growth and crop residues addition. **Geoderma**, v.329, p.1-10, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.04.024>

CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. O.; BORGES, C. D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J. 2017. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. **GCB Bioenergy**, v.9, p.1181–1195. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12410>

CARVALHO, M. A.; RUIZ, H. A.; COSTA, L. M.; PASSOS, R. R.; ARAUJO, C. A. S. Composição granulométrica, densidade e porosidade de agregados de Latossolo Vermelho sob duas coberturas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n. 10, p. 1010–1016, 2014. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n10p1010-1016>

CASTIONI, G. A.; CHERUBIN, M. R.; MENANDRO, L. M. S.; SANCHES, G. M.; BORDONAL, R. O.; BARBOSA, L. C.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: a multi-approach assessment. **Soil Tillage and Research**, v. 184, p. 301-309. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.007>

CASTIONI, G.A.; CHERUBIN, M.R.; BORDONAL, R. O.; BARBOSA, L. C.; MENANDRO, L. M. S.; CARVALHO, J. L. N. Straw removal affects soil physical quality and sugarcane yield in Brazil. **Bioenergy Research**, v. 12, p. 789-800. 2019. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10000->

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n.3, p. 527–538, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000300019>

CAVALCANTE, D.M., FONSECA E SILVA, A.P., DE ALMEIDA, B.G., FREIRE, F.J., DOS SANTOS SILVA, T. H., SILVA CAVALCANTE, F.M., 2021. Physical soil quality indicators for environmental assessment and agricultural potential of Oxisols under different land uses in the Araripe Plateau, Brazil. **Soil and Tillage Research** 209, 104951. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104951>

CAVALCANTI, R. Q.; ROLIM, M. M.; LIMA, R. P.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M. R.; CHERUBIN, M. R. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, v. 370, p. 114353, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114353>

CAVALCANTI, R. Q.; ROLIM, M. M.; LIMA, R.P.; TAVARES, U.E.; PEDROSA, E. M. R.; GOMES, I. F. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.189, p.140-147, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.006>

CEDDIA, M. B.; CUNHA DOS ANJOS, L. H.; LIMA, E.; NETO, A. R.; DA SILVA, L. A.; Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo Podzólico Amarelo no Estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 8, p. 1467-1473, ago. 1999. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000800019>

CESÁRIO, F. V.; DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; BALIEIRO, F. C. Estabilidade de agregados em água: análise crítica e padronização. Rio de Janeiro: **Embrapa: CNPS**, 2010. 7 p. (Embrapa-CNPS. Comunicado Técnico, 57)

CHERUBIN, M.R.; KARLEN, D.L.; FRANCO, C.A.; TORMENA, A.L.C.; CERRI, C.E.P.; DAVIES, C.A.; CERRI, C.C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v. 267, p. 156-166. 2016. ISSN 0016-7061. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, Brasília, DF, v.9, n.3, 2022.

CORBETT, P. W. M., ANGGRAENE, S., BOWDEN, D. “The Use of the Probe Permeameter in Carbonates - Addressing the Problems of Permeability Support and Stationarity. In: **Log Anal.** 40 (5), pp.316-326, Los Angeles, 1999.

DEGENS, B. P.; SPARLING, G. P.; ABBOTT, L. K. Increasing the length of hyphae in a sandy soil increases the amount of water-stable aggregates. **Applied Soil Ecology**, v. 3, n. 2, p. 149–159, 1996. [https://doi.org/10.1016/0929-1393\(95\)00074-7](https://doi.org/10.1016/0929-1393(95)00074-7)

DEMARCHI, J.; PERUSI, M.; PIROLI, E. Análise da estabilidade de agregados de solos da microbacia do Ribeirão São Domingos, Santa Cruz do Rio Pardo – SP, sob diferentes tipos de uso e ocupação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 4, p. 7–29, 2012. <https://doi.org/10.5777/PAeT.V4.N2.01>

DENEF, K.; SIX, J.; PAUSTIAN, K.; MERCKX, R. Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: short-term effects of physical disturbance induced by

dry-wet cycles. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 33, n. 15, p. 2145–2153, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00153-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00153-5)

DEVIREN-SAYGIN, S.; CORNELIS, W. M.; ERPUL, G.; GABRIELS, D. Comparison of different aggregate stability approaches for loamy sand soils. **Applied Soil Ecology**, v. 54, p. 1–6, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.11.012>

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v.31, n. 2, p. 139-147, 1985.

DEXTER, A.R.; WATTS, C. Tensile strength and friability. In: SMITH, K.; MULLINS, C. (Ed.). **Soil and environmental analysis: physical methods**. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2000. chap. 11, p. 401-429.

FALCÃO, K.; MONTEIRO, F.; OZÓRIO, J.; SOUZA, C. S.; FARIAS, P. S.; MENEZES, R.; PANACHUKI, E.; ROSSET, J. Estoque de carbono e agregação do solo sob diferentes sistemas de uso no cerrado. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, v. 55, n. 2, p. 242–255, 2020. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820200695>

FAUSTINO, L. L.; MARCIANO, C. R.; ANDRADE, G. R. P. Physical quality of soil under secondary forest, leguminous trees, and degraded pasture. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.56, e02023, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02023>.

FIGUEIREDO, G. C.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B.; MORAES, S. O.; ALMEIDA, B. G. Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático; modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35(2), p. 389-409, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200009>.

FOX, D. M; DARBOUX, F; CARREGA, P. Effects of fire-induced water repellency on aggregate stability, splash erosion, and saturated hydraulic conductivity for different size fractions. **Hydrological Processes**, v. 21, p. 2377–2384, 2007, <https://doi.org/10.1002/hyp.6758>

FRANCO, H. H. S.; GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; CHERUBIN, M. R.; FAVILLA, H. S. Global applications of the Visual Evaluation of Soil Structure method: A systematic review and meta-analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 190, p. 61–69, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.002>

FULTZ, L.M.; MOORE-KUCERA, J.; DATHE, J.; DAVINIC, M.; PERRY, G.; WESTER, D.; SCHWILK, D.W.; RIDEOUT-HANZAK, S., 2016. Forest wildfire and grassland prescribed fire effects on soil biogeochemical processes and microbial communities: two case studies in the semiarid southwest. **Applied soil ecology**, 99, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.023>

GEE, G. W.; OR, D. Particle-Size Analysis. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. **Methods of Soil Analysis: part 4 physical methods**. Madison: **John Wiley & Sons**, Ltd, 2002. cap. 12, p. 255-293. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12>

GERKE, K. M; KARSANINA, M. V. How pore structure non-stationarity compromises flow properties representativity (REV) for soil samples: pore-scale modelling and stationarity analysis. **European Journal Soil Science**. v. 72, p. 527– 545. 2021. <https://doi.org/10.1111/ejss.13055>

GHOLOUBI, A.; EMAMI, H.; CALDWELL, T. Deforestation effects on soil aggregate stability quantified by the high-energy moisture characteristic method. **Geoderma**, v. 355, 113919. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113919>

GIRONA-GARCÍA, A., BADÍA-VILLAS, D., MARTÍ-DALMAU, C., ORTIZ-PERPIÑÁ, O., MORA, J.L., ARMAS-HERRERA, C.M., 2018. Effects of prescribed fire for pasture management on soil organic matter and biological properties: a 1-year study case in the central Pyrenees. **Science total environmental** 618, 1079–1087. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.127>

HILLEL, D. Environmental soil physics: fundamentals, applications, and environmental considerations. **New York: Academic Press**, California, 1998. 771p.

HILLEL, D. Soil Structure and aggregation. In: **Introduction to Environmental Soil Physics**. San Diego: Elsevier, 2003. cap. 5, p. 73-89.

IBARRA, S.; MCKYES, E.; BROUGHTON, R. Measurement of tensile strength of unsaturated sandy loam soil. **Soil and Tillage Research**, v.81. p.15-23. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.04.002>

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. **Soil Science Society American Journal**, v.66, p.1656-1661, 2002. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1656>

INBAR, A.; LADO, M.; STERNBERG, M.; TENAU, H.; BEN-HUR, M. Forest fire effects on soil chemical and physicochemical properties, infiltration, runoff, and erosion in a semiarid Mediterranean region. **Geoderma**, v. 221–222, p. 131–138, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.015>

KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R.F.; SCHUMAN, G.E. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (A guest editorial). **Soil Science Society American Journal**, 61:4-10, 1997. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate Stability and Size Distribution. In: KLUTE, A. **Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods**. 2 ed. Madison: John Wiley & Sons, Ltd, 1986. cap. 17, p. 425–442. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>

KRISTIANSEN, S. M.; SCHJØNNING, P.; THOMSEN, I. K.; OLESEN, J. E.; KRISTENSEN, K.; CHRISTENSEN, B. T. Similarity of differently sized macro-aggregates in arable soils of different texture. **Geoderma**, v. 137, n. 1, p. 147–154, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.005>

KUNDE, R. J.; LIMA, C. L. R.; ANJOS E SILVA, S. D.; PILLON, C. N. Tensile strength, friability, aggregation, and soil organic matter physical fractions of an Oxisol cultivated with sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 04, p. 487-494. 2018. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000400010>

LAL, R. Soil Structure and Sustainability. **Journal of Sustainable Agriculture**, v. 1, n. 4, p. 67–92, 1991. https://doi.org/10.1300/J064v01n04_06

LEHMANN, A.; ZHENG, W.; RILLIG, M.C., 2017. Soil biota contributions to soil aggregation. **Nature, ecology and evolution**. 1, 1828–1835. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0344-y>

- LEHRSCHE, G.A.; SOJKA, R.E.; KOEHN, A.C., 2012. Surfactant effects on soil aggregate tensile strength. **Geoderma** 189–190, 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.06.015>
- LEPSCH, I. F. Histórico e fundamentos da ciência do solo. In: **19 lições de Pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. cap. 1, p. 28–69.
- LI, X.; VOGELER, I.; SCHWENDENMANN, L.; LI, X.; VOGELER, I.; SCHWENDENMANN, L. Soil aggregation and soil fraction associated carbon under different vegetation types in a complex landscape. **Soil Research**, v. 57, n. 3, p. 215–227, 2019. <https://doi.org/10.1071/SR18193>
- LUAN, H.; YUAN, S.; GAO, W.; TANG, J.; LI, R.; ZHANG, H.; HUANG, S. Changes in organic C stability within soil aggregates under different fertilization patterns in a greenhouse vegetable field. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 20, n. 10, p. 2758–2771, 2021. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(21\)63646-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(21)63646-8)
- LUZ, F. B.; CARVALHO, M.L.; BORBA, D. A.; SCHIEBELBEIN, B. E.; LIMA, R. P.; CHERUBIN, M. R. Linking soil water changes to soil physical quality in sugarcane expansion areas in Brazil. **Water**, v. 12 (11), p. 3156. 2020. <https://doi.org/10.3390/w12113156>.
- MARCELO, V. F.; ALMEIDA, B. G.; ARAÚJO FILHO, J.; SOUZA, W. Disponibilidade hídrica de solo coeso sob a ação de poliácridamida: qualidade física ambiental. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, n. 42, p. 12–25, 2016. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820160009>
- MÁRQUEZ, C. O.; GARCIA, V. J.; CAMBARDELLA, C. A.; SCHULTZ, R. C.; ISENHART, T. M. Aggregate-Size Stability Distribution and Soil Stability. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 3, p. 725–735, 2004. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.7250>
- MAZURAK, A. P. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates. **Soil Science**, v. 69, n. 2, p. 135–148, 1950. <https://doi.org/10.1097/00010694-195002000-00005>
- MAZURANA, M.; LEVIEN, R.; MÜLLER, J.; CONTE, O. Sistemas de preparo de solo: alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1197–1206, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400013>
- MOTA, J. C. A.; SILVA, C. P., ALMEIDA, B. G.; ROMERO, R. E.; ALENCAR, T. L.; LOBATO, M. G. R.; OLIVEIRA, L. S.; SOUZA, L. S.; COSTA, M. C. G. Cohesive character in Alfisols, Ultisol and Oxisols in Northeast of Brazil: Relationship of tensile strength with silicon, aluminum and iron from poorly crystalline compounds, **Geoderma Regional**, v. 24, e00361, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021>.
- MUNKHOLM, L.J.; KAY, B.D. Effect of water regime on aggregate-tensile strength, rupture energy, and friability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 3, p. 702–709, May/June 2002. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.7020>
- MUÑOZ-ROJAS, M.; LEWANDROWSKI, W.; ERICKSON, T.E.; DIXON, K.W.; MERRITT, D. J. Soil respiration dynamics in fire affected semi-arid ecosystems: effects of vegetation type and environmental factors. **Science of the Total Environment**, v. 26, p.1-10. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.086>

NIMMO, J.R.; PERKINS, K. Aggregate stability and size distribution. In: DANE, J.H., TOPP, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 4 – Physical Methods*, **Soil Science Society of America Book Series 5**, SSSA, Madison, p. 317 - 328. 2002. [10.2136/sssabookser5.1.4ed](https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.4ed)

NORTON, L.D.; MAMEDOV, A.I.; HUANG, C.H.; LEVY, G.J. Soil aggregate stability as affected by long-term tillage and clay mineralogy. **Advances in GeoEcology**, v.39, p.422-429, 2006. <https://naldc-legacy.nal.usda.gov/r/3650>

NOURI, A.; LEE, J.; YIN, X.; TYLER, D. D.; SAXTON, A. M. Thirty-four years of no-tillage and cover crops improve soil quality and increase cotton yield in Alfisols, Southeastern USA. **Geoderma**, v. 337, p. 998–1008, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.016>

ORTIZ, P. F. S.; ROLIM, M. M.; LIMA, J. L. P.; PEDROSA, E. M. R.; DANTAS, M. S. M., TAVARES, U. E. Physical qualities of an Ultisol under sugarcane and Atlantic Forest in Brazil, **Geoderma Regional**, v. 11, p.62-70. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.10.001>

PALESE, A. M.; GIOVANNINI, G.; LUCCHESI, S.; DUMONTET, S.; PERUCCI, P. Effect of fire on soil C, N and microbial biomass. **Agronomie**, v. 24, p. 47-53, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000800008>

PEREIRA, P., BREVIK, E., BOGUNOVIC, I., FERRAN, E.-S., 2019. Ash and soils: a close relationship in fire-affected areas. In: PEREIRA, P., MATAIX-SOLERA, J., ÚBEDA, X., REIN, G., CERDÀ, A. (Eds.), *Fire Effects on Soil Properties*. CSIRO Publishing.

PORTELLA, C. M. R.; GUIMARÃES, M. F.; FELLER, C.; FONSECA, I. C. B.; TAVARES FILHO, J. Soil aggregation under different management systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1868–1877, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600021>

PREVEDELLO, C.L.; ARMINDO, R. A. Física do solo com problemas resolvidos - 2ª Edição revisada e ampliada. Curitiba: PREVEDELLO, C. L. 2015. 474p. ISBN: 8590757420.

QUEIROZ, A. S.; DIAS, C. T. S.; LOPES, A. S.; NASCIMENTO, I. V.; OLIVEIRA, L. S.; ALMEIDA, B. G.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SOUZA L. S.; SILVA, M. B., ROMERO R. E., TOMA, R. S., SOUSA, H. H. F., MOTA, J. C. A. Water content as a deterministic factor in the assessment of cohesive character in soils of Coastal Tablelands (Northeast, Brazil), **Geoderma Regional**, Volume 32, 2023, e00600, ISSN 2352-0094. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00600>

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H. J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122–137, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>

REDIN, M.; SANTOS, G. F.; MIGUEL, P.; DENEGA, G. L.; LUPATINI, M.; DONEDA, A.; SOUZA, E. L. Impactos da Queima sobre Atributos Químicos, Físicos e Biológicos do Solo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 381-392, abr.-jun., 2011. <https://doi.org/10.5902/198050983243>

REID, E. V.; SAMUELSON, M. B.; BLANCO-CANQUI, H.; DRIJBER, R.; KADOMA, I.; WORTMAN, S. E. Biodegradable and biobased mulch residues had limited impacts on soil properties but reduced yield of the following crop in a low

fertility soil. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v.37, p.490–503. 2022. <https://doi.org/10.1017/S1742170522000217>

ROMANO, N.; HOPMANS, J.W.; DANE, J.H. Suction table. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C., eds. Methods of soil analysis. Madison, **Soil Science Society of America**, 2002. p. 692-698. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12>

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; MOURA, O. V. T.; ALMEIDA, A. P. C. Vias de formação, estabilidade e características químicas de agregados em solos sob emas de manejo agroecológico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1677–1685, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000700068>

SAIEDI, N.; BESALATPOUR, A. A.; SHIRANI, H.; ABBASZADEH DEHAJI, P.; ESFANDIARPOUR, I.; FARAMARZI, M. Aggregation and fractal dimension of aggregates formed in sand dunes stabilized by PistachioPAM and PistachioPVAc mulches. **European Journal of Soil Science**, v. 68, n. 5, p. 783–791, 2017. <https://doi.org/10.1111/ejss.12458>

SANTÍN C.; DOERR S. H. Fire effects on soils: the human dimension. **Philosophical Transactions of the royal Society**. 2016, 371:20150171. <http://doi.org/10.1098/rstb.2015.0171>

SANTOS, H. G. dos; CARVALHO JUNIOR, W. de; DART, R. de O.; AGLIO, M. L. D.; SOUSA, J. S. de; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. da S.; OLIVEIRA, A. P. de. O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p. (**Embrapa Solos. Documentos, 130.**) 1 mapa, color. Escala 1:5.000.000. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/123772/1/DOC-130-O-novo-mapa-de-solos-do-Brasil.pdf>

SCHWEIZER, S. A.; BUCKA, F. B.; GRAF-ROSENFELLNER, M.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil microaggregate size composition and organic matter distribution as affected by clay content. **Geoderma**, v. 355, p. 113901, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113901>

SILVA, A. J. N.; RIBEIRO, M. R.; MERMUT, A. R.; BENKE, M. B. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em Latossolos Amarelos coesos do Estado de Alagoas: propriedades micromorfológicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 515-525, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000300018>

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 2, p. 311–317, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000200017>

SILVA, M. O.; VELOSO, C. L.; NASCIMENTO, D. L.; OLIVEIRA, J.; PEREIRA, D. F.; COSTA, K. D. S. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47838–47855, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-431>

SIX, J.; PAUSTIAN, K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 68, p. A4–A9, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.014>

SOUZA, Z. M. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar, **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 40, n. 3, p. 271-278, mar. 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000300011>

SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 937-944. 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000600001>

STUMPF, L.; LEAL, O.; PAULETTO, E.; PINTO, L.; REIS, D.; PINTO, M.; TUCHTENHAGEN, I. Tensile strength and organic matter fractions in aggregates of a grass-covered mined soil under early stage recovery. **Soil and Tillage Research**. v. 176, p. 69-76. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.11.006>.

TENELLI, S., DE OLIVEIRA BORDONAL, R., BARBOSA, L.C.; CARVALHO, J., L., N, Can reduced tillage sustain sugarcane yield and soil carbon if straw is removed? **Bioenergy Research**. v.12, p.764-777. 2019. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-09996-3>

TERASSI, P. M. B.; SILVEIRA, H.; BONIFÁCIO, C. M. Variação da estabilidade de agregados e as suas relações com a vulnerabilidade dos solos ao longo de uma vertente na região noroeste do paraná. **Boletim de Geografia**, v. 32, n. 1, p. 166–176, 2014. <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v32i1.18169>

THOMAS PAULSON, M.M.C; AGGARWAL, B.K.; RAM, S.; MONDAL, S.M.A.K; CHAKRABORTY, D. Strength and stability of aggregates as the key indicators for evaluating soil physical conditions. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, v. 66 (3), p. 268–274, 2018. ISSN 0974-0228. <http://epubs.icar.org.in/ejournal/index.php/JISSS/article/view/86458>

THOMAZ, E. L., 2011. Influência da temperatura no diâmetro e na estabilidade de agregados em chernossolo, Saskatchewan, Canadá. **Ciencia del suelo**, 29, 277-284. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S185020672011000200016&lng=es&nrm=iso

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 141–163, 1982. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>

TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.33-42, 2008. [10.1590/S0100-06832008000100004](https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100004).

TRANNIN, I. C. de B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Atributos químicos e físicos de um solo tratado com biossólido industrial e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.3, p.223-230, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000300001>

TYE, A. M.; ROBINSON, D. A.; LARK, R. M. Gradual and anthropogenic soil change for fertility and carbon on marginal sandy soils. **Geoderma**, v. 207–208, p. 35–48, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.004>

UTOMO, W.H.; DEXTER, A.R. Soil friability. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 32, n. 2, p. 203-213, 1981.

UTSET, A.; CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a ferralsol at several soil moisture conditions. **Soil Tillage Research**, Oxford, v. 61, n. 3-4, p. 193-202, sept. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00204-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00204-5)

VAEZI, A. R.; ESLAMI, S. F.; KEESSTRA, S. Interrill erodibility in relation to aggregate size class in a semi-arid soil under simulated rainfalls. **CATENA**, v. 167, p. 385–398, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.003>

VAN BAVEL, C. H. M. Mean Weight-Diameter of Soil Aggregates as a Statistical Index of Aggregation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 14, n. C, p. 20–23, 1950. <https://doi.org/10.2136/sssaj1950.036159950014000C0005x>

VIEIRA, A. C.; MELLONI, E.; GUIMARÃES, M.; FREITAS, M.; PECORARO, D.; Fogo e seus efeitos na qualidade do solo de pastagem (Fire and its effects on the quality of pasture). **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.l.], v. 9, n. 6, p. 1703-1711, nov. 2016. ISSN 1984-2295. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.6.p1703-1711>

VIK, B., BASTESSEN, E., SKAUGE, A.; Evaluation of representative elementary volume for a vuggy carbonate rock – Part I: Porosity, permeability, and dispersivity. In: **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 112, pp. 36-47, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.03.029>

WANG, D.; FONTE, S. J.; PARIKH, S. J.; SIX, J.; SCOW, K. M. Biochar additions can enhance soil structure and the physical stabilization of C in aggregates. **Geoderma**, v. 303, p. 110–117, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.027>

WATTS, C.W.; DEXTER, A. R. Soil friability: Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, v. 49, p. 73- 84, 1998. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1998.00129.x>

WENDLING, B.; FREITAS, I. C. V.; OLIVEIRA, R. C.; BABATA, M. M.; BORGES, E. N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de Conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e Plantio direto. **Bioscience Journal**, v.28, p.256- 265, 2012. <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/13277>.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.487-494, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000500010>

ZHANG, H.; HARTGE, K. H.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.1, p.239-245, 1997. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010033x>

ZHANG, S. L., WANG, R. J., YANG, X. Y., SUN, B. H. & LI, Q. H. Soil aggregation and aggregating agents as affected by long term contrasting management of an Anthrosol. **Sci. Rep.** 6, 39107 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep39107>