

IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL EM CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR IMPACTAM A AGREGAÇÃO DO SOLO?

YASMIN REIS MAGALHÃES¹; ANDERSON PRATES COELHO²; CAROLINA FERNANDES¹; ALEXANDRE BARCELLOS DALRI²

¹ Departamento de Ciências da Produção Agrícola, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Via de Acesso Professor Paulo Donato Castellane, s/n Km 5, 14884-900, Jaboticabal, São Paulo, Brasil. yasmin.magalhaes@unesp.br; carolina.fernandes@unesp.br

² Departamento de Engenharia e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Via de Acesso Professor Paulo Donato Castellane, s/n Km 5, 14884-900, Jaboticabal, São Paulo, Brasil. anderson_100ssp@hotmail.com; alexandre.dalri@unesp.br

1 RESUMO

Objetivou-se avaliar o efeito da irrigação por gotejamento subsuperficial em cultivares de cana-de-açúcar, contrastantes na responsividade à irrigação, na agregação de Latossolo argiloso. O experimento foi realizado em Latossolo Vermelho eutroférico, de textura argilosa (587 g kg⁻¹ de argila). Foram coletadas amostras deformadas de solo em vinte pontos em cada uma das quatro áreas de cana-de-açúcar avaliadas nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m. As áreas correspondiam ao cultivo irrigado e não irrigado, das cultivares CTC 4 e IACSP93-3046. Foram determinados e calculados o índice de estabilidade dos agregados, diâmetro médio ponderado de agregados, fracionamento físico do carbono orgânico e as classes de agregados. Os dados foram submetidos à estatística descritiva e multivariada de fatores. De acordo com as correlações das variáveis, a agregação do solo foi dividida em dois processos, sendo o primeiro denominado de “Dimensão de agregados” e o segundo “Estabilidade de agregados”. Observou-se que a irrigação por gotejamento subsuperficial promove maior “Estabilidade de agregados” do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Além disso, cultivares de cana-de-açúcar proporcionam diferenças na agregação do solo, sendo que a cultivar responsiva à irrigação IACSP93-3046 promove maior “Dimensão de agregados” do solo em relação a cultivar não responsiva CTC 4.

Palavras-chave: diâmetro médio ponderado de agregados, estabilidade de agregados, carbono orgânico, Latossolo.

MAGALHÃES, Y. R.; COELHO, A. P.; FERNANDES, C.; DALRI, A. B.
DOES SUBSURFACE DRIP IRRIGATION IN SUGARCANE CULTIVARS IMPACT
SOIL AGGREGATION?

2 ABSTRACT

The aim was to evaluate the effect of subsurface drip irrigation with sugarcane cultivars, contrasting in the responsiveness to irrigation, in the aggregation of Oxisol clayey. The experiment was conducted in a clayey Oxisol (587g kg⁻¹ of clay). Deformed soil samples were collected at twenty points in each four areas of sugarcane evaluated in the layers 0.00-0.10 m

and 0.10-0.20 m. The areas corresponded to the irrigated and non-irrigated cultivation of cultivars CTC 4 and IACSP93-3046. The aggregate stability index, weighted average diameter of aggregates, physical fractionation of organic carbon and aggregate classes were determined and calculated. The data were submitted to the descriptive and multivariate factor statistics. According to the correlations of the variables, soil aggregation was divided into two processes, the first being called "Aggregates dimension" and the second "Aggregates stability." It was observed that subsurface drip irrigation promotes greater soil "Aggregate stability" in areas cultivated with sugarcane. Additionally, sugarcane cultivars provide differences in soil aggregation, and the cultivar responsive to irrigation IACSP93-3046 promotes a larger soil "Aggregates dimension" than the non-responsive cultivar CTC 4.

Keywords: weighted average diameter of aggregates, aggregate stability, organic carbon, Oxisol.

3 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é a terceira cultura mais plantada no Brasil, com área cultivada de aproximadamente 10 milhões de hectares (CANA-DE-AÇUCAR, 2020). Devido ao intenso tráfego de máquinas e implementos, o cultivo de cana-de-açúcar pode promover redução da qualidade física do solo, aumentando a densidade e reduzindo a agregação do solo (CHERUBIN *et al.*, 2016; CASTIONI *et al.*, 2018). Essas alterações na estrutura do solo podem levar à compactação, erosão e perda da capacidade de uso do solo, interferindo diretamente na conservação dos agroecossistemas.

Sistemas de produção conservacionistas são comumente empregados para melhorar a estrutura e a fertilidade do solo, além de prevenir sua degradação. Dentre os principais atributos físicos e químicos de um solo estão as variáveis de agregação e o teor de carbono orgânico, respectivamente. A agregação das partículas e a quantidade de carbono no solo são fatores relevantes para a obtenção de elevados rendimentos agrícolas. Esses fatores atuam em conjunto, disponibilizando nutrientes, água, oxigênio e estrutura ideal para o desenvolvimento das raízes das plantas e, assim, favorecem o desenvolvimento das culturas (OADES, 1984).

A agregação influencia diversos atributos do solo como a macro e a microporosidade, a aeração do solo e a atividade microbiana (SILVA; CABEDA; CARVALHO, 2006). Além disso, a agregação pode aumentar a retenção e a disponibilidade de água para as culturas (SILVA; CABEDA; CARVALHO, 2006), proporcionando uso mais racional da irrigação, reduzindo a quantidade de água aplicada e, conseqüentemente, os custos com a operação. Para a agregação ocorrer, são necessárias substâncias agregantes, conhecidas como agentes cimentantes. Dentre os principais agentes cimentantes, destacam-se a fração argila do solo, o carbono orgânico, os exsudatos liberados pelas raízes e os microrganismos do solo (OADES; WATERS, 1991; SIX *et al.*, 2004; SEBEN JÚNIOR; CORÁ; LAL, 2016).

Considerando a aplicação de vinhaça como um manejo de irrigação, a cana-de-açúcar é a cultura que apresenta a maior área irrigada do Brasil, com 1,7 milhões de hectares (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017). Além da aplicação de vinhaça por sistemas de irrigação autopropelidos, os sistemas de irrigação mais utilizados na cana-de-açúcar são por gotejamento subsuperficial e aspersão por pivô-central.

As vantagens da irrigação por gotejamento subsuperficial para o aumento

da produtividade da cana-de-açúcar são incontestáveis, observando-se incrementos de até 60% em relação a áreas não irrigadas (COELHO *et al.*, 2018a). Estudos têm demonstrado que a irrigação, além de aumentar a produtividade das culturas, pode incrementar a produção de biomassa total das áreas e, conseqüentemente, o teor de carbono orgânico do solo, promovendo benefícios diretos na agregação do solo (SEBEN JÚNIOR; CORÁ; LAL, 2016) e indiretos, através do sequestro de carbono pelo solo e redução da emissão de CO₂ para a atmosfera (NICOLOSO; AMADO; RICE, 2020). Entretanto, pouco se sabe sobre o efeito da irrigação por gotejamento subsuperficial na agregação de solos cultivados com cana-de-açúcar.

No Brasil, existem 208 cultivares (*Saccharum* spp.) de cana-de-açúcar registradas (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2020), cada uma apresentando melhor adaptação em determinados ambientes de produção (PRADO, 2005). As cultivares de cana-de-açúcar apresentam elevada variabilidade na distribuição e densidade do seu sistema radicular (SOUSA *et al.*, 2013), afetando diretamente a resposta em áreas irrigadas e não irrigadas (COELHO *et al.*, 2018a; FISCHER FILHO, 2018).

As diferenças no sistema radicular podem afetar diferentemente a agregação do solo, pois a densidade de raízes das cultivares de cana-de-açúcar nas camadas mais superficiais do solo pode variar em mais de 100% (LANDELL; BRESSIANI, 2008). Nesse sentido, estudos sobre os efeitos da irrigação por gotejamento subsuperficial e de cultivares de cana-de-açúcar sobre a agregação do solo são fundamentais para indicar os melhores manejos para a cultura, auxiliando na conservação do solo nas áreas cultivadas.

Com a hipótese de que a irrigação por gotejamento subsuperficial melhora a agregação do solo em áreas cultivadas com

cana-de-açúcar e que esse efeito depende da cultivar utilizada, objetivou-se avaliar o efeito da irrigação por gotejamento subsuperficial em cultivares de cana-de-açúcar na agregação de um Latossolo argiloso.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, São Paulo, Brasil. A área experimental é situada próxima às coordenadas de latitude 21°14'50" S, longitude 48°17'05" W e altitude de 570 m, com declividade de 8%.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Aw, caracterizado por precipitação anual média de 1.425 mm, com precipitação média para o mês mais chuvoso de 255 mm (dezembro) e de 25 mm para o mês mais seco (julho).

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho eutroférico (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2013) de textura argilosa, com 582 g kg⁻¹ de argila, 235 g kg⁻¹ de silte e 183 g kg⁻¹ de areia na camada 0,00 - 0,10 m, e 591 g kg⁻¹ de argila, 231 g kg⁻¹ de silte e 178 g kg⁻¹ de areia na camada 0,10 - 0,20 m.

Foram avaliadas quatro áreas, constituídas com as cultivares de cana-de-açúcar CTC 4 e IACSP93-3046, submetidas à irrigação subsuperficial e não irrigadas. As áreas foram provenientes de um experimento mantido sob delineamento de blocos incompletos parcialmente balanceados em esquema de parcelas subdivididas. No experimento original, os tratamentos foram constituídos por dois manejos de irrigação (irrigado e não irrigado), alocados nas parcelas, e cinco cultivares de cana-de-açúcar (CTC 4, IACSP93-3046, RB86-7515, IAC95-5000 e IAC91-1099), alocadas nas subparcelas, com seis repetições.

Para avaliação dos atributos de agregação do solo e do teor de carbono orgânico, foram utilizadas as áreas sob os tratamentos com as cultivares CTC 4 e IACSP93-3046 mantidas com e sem irrigação, totalizando quatro áreas.

As cultivares CTC 4 e IACSP93-3046 foram escolhidas, pois, foram as que apresentaram as maiores diferenças de crescimento e produtividade quando cultivadas com e sem irrigação, conforme observado nos trabalhos de Coelho *et al.* (2018a) e Fischer Filho (2018). Nos quatro primeiros cortes, observou-se que a produtividade da cultivar CTC 4 não foi incrementada pelo uso da irrigação, enquanto a cultivar IACSP93-3046 foi a que apresentou o maior incremento percentual na produtividade quando irrigada.

A cana-de-açúcar foi plantada em novembro de 2014, utilizando-se mudas pré-brotadas, com espaçamento entre linhas de 1,5 m e entre plantas de 0,50 m. Na adubação de plantio, realizada no sulco, foram aplicados 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (superfosfato simples) e 60 kg ha⁻¹ de K₂O (cloreto de potássio). O primeiro e o segundo cortes do experimento foram realizados no mês de maio de 2015 e 2016, respectivamente, enquanto o terceiro e o quarto cortes foram realizados no mês de julho de 2017 e 2018, respectivamente.

A adubação de cobertura desde o primeiro ano de cultivo foi realizada utilizando 120 kg ha⁻¹ de N (sulfato de amônio) e 160 kg ha⁻¹ de K₂O (cloreto de potássio). A adubação na área irrigada ocorreu via fertirrigação, parcelada em seis vezes no primeiro ano, com doses iguais entre os meses de novembro e abril, e parcelada em oito vezes do segundo ao quarto corte, entre os meses de setembro e abril. Para a área não irrigada, a adubação foi realizada em cobertura no solo, parcelada em duas vezes, sendo uma aos 60 e outra aos 90 dias após o plantio ou o corte do ciclo anterior.

O manejo da irrigação adotado supriu 100% da evapotranspiração da cultura (ET_c), aplicando-se 20 mm de água quando o déficit hídrico da área (ET_c – precipitação pluvial) fosse igual a 20 mm (DALRI; CRUZ, 2002). A evapotranspiração de referência foi calculada conforme o método FAO 56, assim como o coeficiente de cultivo para a cana-de-açúcar (ALLEN *et al.*, 1998). Os valores de K_c adotados foram: 0,50 (0-30 dias após a colheita ou plantio – DAC); 0,60 (31-60 DAC); 0,75 (61-90 DAC); 0,85 (91-120 DAC); 0,95 (121-180 DAC); 1,10 (181-240 DAC); 1,20 (241-335 DAC); sem irrigação (336-365 DAC). O manejo não irrigado recebeu água somente das precipitações pluviais.

A amostragem do solo foi conduzida em outubro de 2018, após o quarto corte da cana-de-açúcar, realizado em julho de 2018. O solo foi coletado na linha da cana-de-açúcar, entre as touceiras formadas pelas mudas pré-brotadas. Para determinar os atributos do solo, foram coletadas amostras deformadas de solo nas camadas 0,00 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m, utilizando enxadão.

Para cada camada, foram amostrados vinte pontos em cada uma das quatro áreas, totalizando cento e sessenta (160) amostras. Cada amostra foi dividida em duas partes, em que uma parte foi utilizada para separação de agregados com diâmetro entre 6,3 e 4,0 mm e posterior determinação do diâmetro médio ponderado dos agregados do solo (DMP) (NIMMO; PERKINS, 2002). A outra parte foi dividida em outras duas partes, sendo uma parte utilizada para separação dos agregados de diâmetro entre 2,0 e 1,0 mm, para a determinação do índice de estabilidade de agregados do solo (IEA) (NIMMO; PERKINS, 2002) e a outra parte utilizada para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), fração do solo menor que 2,0 mm.

A partir da TFSA, pelo processo de fracionamento físico do carbono orgânico (CO) (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992), foi obtido o material para a

determinação do teor de carbono orgânico particulado (COP). Os teores de CO e COP foram determinados por método colorimétrico (YEOMANS; BREMER, 1988). O teor de carbono orgânico associado aos minerais (COAM) foi obtido pela diferença entre o teor de CO e COP.

Na determinação do DMP foram calculadas as classes de agregados 6,3 - 4,0 mm (CA1); 4,0 - 1,0 mm (CA2), 1,0 - 0,5 mm (CA3) e <0,5 mm (CA4), sendo utilizadas como variáveis nas análises estatísticas.

Na análise do estudo foi realizada, primeiramente, a estatística descritiva dos atributos do solo para cada tratamento, utilizando-se para isso a média e o erro padrão da média. Posteriormente, devido à estrutura de dependência das variáveis analisadas, foi realizada análise multivariada de fatores, que possibilitou projetar toda informação contida nas variáveis originais em novas variáveis latentes, que são os processos (HAIR *et al.*, 2009). Como em análise multivariada não se utilizam variáveis calculadas em função de outras presentes no conjunto original de variáveis, o CO não foi utilizado na análise multivariada, por ser uma variável obtida pela soma do COP e do COAM, preferindo-se utilizar essas duas variáveis individuais.

Os dados foram padronizados, com o objetivo de todas as variáveis apresentarem o mesmo peso na análise, apresentando média nula e variância unitária. O número de fatores foi escolhido utilizando o critério de

Kaiser (1958), selecionando os fatores com autovalores superiores a 1.

Os autovalores foram extraídos da matriz de covariância das variáveis originais. Para a análise de fatores, variáveis com cargas fatoriais acima de 0,60 foram consideradas relevantes para o processo. Os atributos com coeficientes de mesmo sinal se correlacionam diretamente entre si dentro do processo, enquanto os atributos com coeficientes de sinais distintos se correlacionam indiretamente. Após a análise de fatores, os escores gerados para cada amostra e processos foram testados como modelo linear generalizado (MILSTEIN *et al.*, 2005), objetivando comparar os tratamentos nos processos obtidos. Quando significativos no modelo linear generalizado, os escores dos tratamentos foram analisados pelo teste de média de Tukey ao nível de 5% probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas no software Statistica®, versão 7.0.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise estatística multivariada de fatores, foram obtidos dois processos, sendo que o primeiro processo (P1) explicou 53,66% da variância do conjunto original dos dados e o segundo processo (P2) explicou 16,12%, possibilitando reter 69,78% da variabilidade geral dos dados (Tabela 1).

Tabela 1. Cargas fatoriais da análise de fatores dos atributos de agregação do solo avaliados, com dois processos (P1 e P2), em função de cultivares de cana-de-açúcar submetidas à irrigação e não irrigadas

Atributo	Dimensão de agregados (P1)	Estabilidade de agregados (P2)
Diâmetro médio ponderado de agregados (DMP)	-0,977	0,049
Carbono orgânico particulado (COP)	-0,631	-0,004
Classe de agregados entre 6,3 - 4,0 mm (CA1)	-0,975	0,134
Classe de agregados entre 4,0 - 1,0 mm (CA2)	0,714	-0,563
Classe de agregados entre 1,0 - 0,5 mm (CA3)	0,938	-0,086
Classe de agregados < 0,5 mm (CA4)	0,525	0,600
Índice de estabilidade de agregados (IEA)	-0,366	-0,753
Carbono orgânico associado aos minerais (COAM)	-0,437	-0,165
Variância explicada	4,293	1,290
% da variância explicada	53,66	16,12

Fonte: Os autores (2021)

O P1 foi denominado de “Dimensão de agregados” devido às variáveis relevantes nesse processo, com escores maior que 0,60, serem relacionadas ao tamanho e formação dos agregados do solo, que são o diâmetro médio ponderado de agregados (DMP), carbono orgânico particulado (COP) e as classes de agregados (CA) CA1, CA2 e CA3. O P2 foi denominado de “Estabilidade de agregados”, pois as variáveis relevantes para esse processo, com escores maior que 0,60, foram relacionadas ao índice de estabilidade dos agregados em água e a classe de agregados CA4.

Verificou-se para o conjunto de dados, do presente estudo, que a agregação do solo pode ser dividida em dois fatores independentes, sendo um relacionado à dimensão dos agregados e outro à estabilidade dos agregados. Isso demonstra que o tamanho e a estabilidade de agregados não estão associados, atuando diferentemente sobre a agregação do solo. Enquanto para a “Dimensão de agregados” o COP atua diretamente na formação de agregados maiores, na “Estabilidade de agregados” nenhum fracionamento físico do carbono orgânico atua diretamente nesse processo do solo (Tabela 1).

No processo “Dimensão de agregados” (P1), os atributos do solo com coeficientes de correlação negativos DMP, COP e CA1 apresentaram correlação direta entre si e estes apresentaram correlação indireta com os atributos CA2 e CA3. Ao atuar como agente cimentante para a formação de agregados maiores, o COP une os agregados da CA3, formando agregados da CA2. Por sua vez, os agregados da CA2, por ação do COP, se unem, formando agregados da CA1. Esse processo aumenta a quantidade de agregados retidos na CA1 e, conseqüentemente, os valores de DMP. Assim, o aumento do teor de COP incrementa as variáveis DMP e CA1, reduzindo a CA2 e CA3, justificando a relação inversa das variáveis DMP, COP e CA1 com as variáveis CA2 e CA3.

Para o processo “Estabilidade de agregados” (P2), o atributo negativo IEA possui relação inversa com a CA4. Assim, quanto maior o valor do IEA, menor a quantidade de solo retido na menor classe de agregado (CA4). Isso ocorre porque os agregados são mais resistentes aos agentes causadores de ruptura, por exemplo, apresentam maior resistência ao impacto

gerado pela gota da chuva (*Splash*), e não se quebram em agregados pequenos (CA4).

De acordo com o modelo linear generalizado, observou-se que não houve efeito significativo das interações para nenhum dos processos, somente dos fatores isolados (Tabela 2). Para o processo

“Dimensão de agregados”, houve significância para cultivar e camada, enquanto para o processo “Estabilidade de agregados”, ocorreu efeito significativo somente para a irrigação, confirmando a independência dos processos obtidos na análise multivariada.

Tabela 2. Modelo linear generalizado para o processo “Dimensão de agregados” (P1) e “Estabilidade de agregados” (P2)

Fonte de variação	Dimensão de agregados P1		Estabilidade de agregados P2	
	F	valor-p	F	valor p
Cultivar	3,600*	0,049	0,712	0,400
Irrigação	0,698	0,405	56,072**	<0,001
Camada	99,027**	<0,001	0,183	0,669
Cultivar x Irrigação	0,009	0,924	1,617	0,206
Cultivar x Camada	0,279	0,598	0,004	0,947
Manejo x Camada	0,193	0,661	2,904	0,091
Cultivar x Manejo x Camada	0,732	0,394	0,588	0,445

*Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade

Fonte: Os autores (2021)

Realizando o teste de média para o processo 1, observou-se que a “Dimensão de agregados” foi maior para a camada do solo 0,00 - 0,10 m e para as áreas cultivadas com a cultivar IACSP93-3046 (responsiva à irrigação). Para o processo 2, a “Estabilidade de agregados” foi superior para o manejo irrigado (Tabela 3). Os escores negativos gerados pelo teste de média (Tabela 3) se

relacionam com os escores negativos da análise de fatores (Tabela 1), e os escores positivos se relacionam com os escores positivos da análise de fatores. Dessa forma, as áreas com escores de sinal negativo no P1 (Tabela 3) apresentam maior DMP, COP e CA1, assim como no P2 as áreas com escores negativos possuem maior IEA e os negativos possuem maior CA4.

Tabela 3. Teste de média dos escores para os efeitos significativos do modelo linear generalizado para cada processo

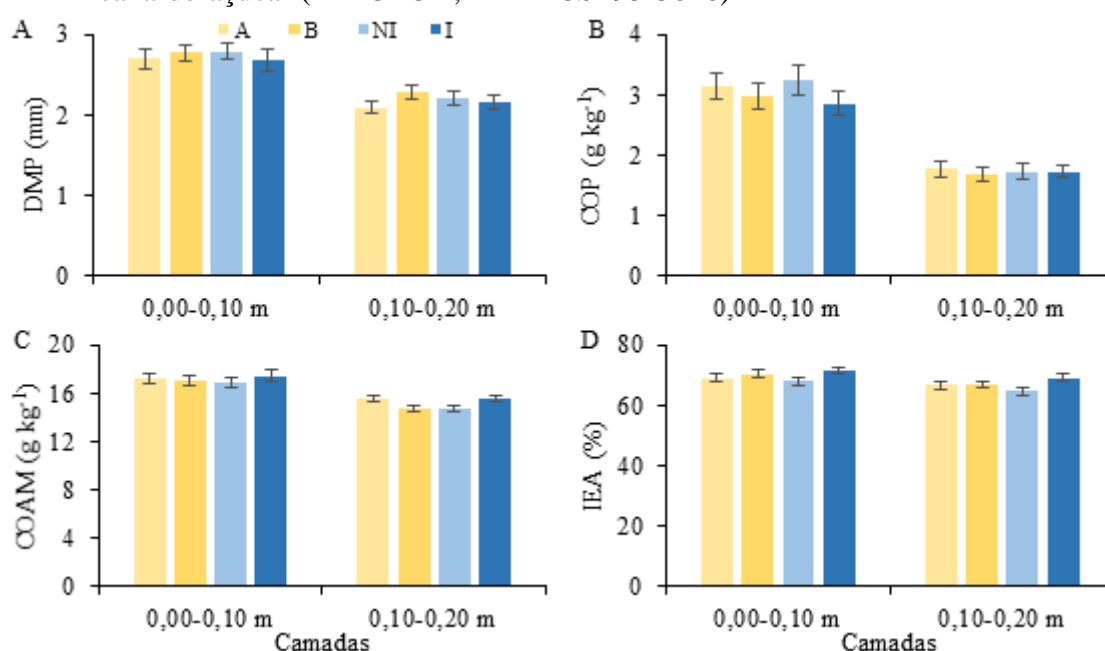
Fonte	Dimensão de agregados - P1		Estabilidade de agregados - P2	
Cultivar	CTC 4 (A)	IACSP 93-3046 (B)		
Média	0,13 b	-0,13 a		
Irrigação			Irrigado (I)	Não Irrigado (NI)
Média			-0,53 a	0,54 b
Camada (m)	0,00-0,10	0,10-0,20		
Média	-0,66 a	0,62 b		

Fonte: Os autores (2021)

A estatística descritiva dos atributos do solo DMP, COP, COAM e IEA é apresentada na Figura 1. Para o DMP, considerando-se o erro padrão da média, observaram-se diferenças de valores médios somente entre as áreas com as cultivares CTC 4 (A) e IACSP93-3046 (B) na camada

0,10 - 0,20 m, com valor 9,0% superior para a área com a cultivar IACSP93-3046 (responsiva à irrigação). Destaca-se que todas as áreas apresentaram maior valor de DMP na camada 0,00 - 0,10 m, com média 25,0% superior à camada 0,10 - 0,20 m.

Figura 1. Diâmetro médio ponderado de agregados (DMP - A), carbono orgânico particulado (COP - B), carbono orgânico associado aos minerais (COAM - C) e índice de estabilidade de agregados (IEA - D) de Latossolo Vermelho de textura argilosa cultivado com irrigação (I) e sem irrigação (NI) em função de duas cultivares de cana-de-açúcar (A – CTC 4; B – IACSP93-3046)



Fonte: Os autores (2021)

Quanto ao COP, observaram-se diferenças somente entre camadas do solo, em que a camada 0,00 - 0,10 m apresentou valor médio 76,2% superior à camada 0,00 - 0,10 m, enquanto entre as áreas os valores foram semelhantes nas duas camadas. Essa mesma observação pode ser aplicada para o COAM, em que a camada 0,00 - 0,10 m apresentou valor médio 13,4% superior em relação à camada 0,10 - 0,20 m. Entretanto, observaram-se diferenças entre áreas na camada 0,10 - 0,20 m, em que a cultivar CTC 4 e a área sob irrigação apresentaram maiores valores médios de COAM.

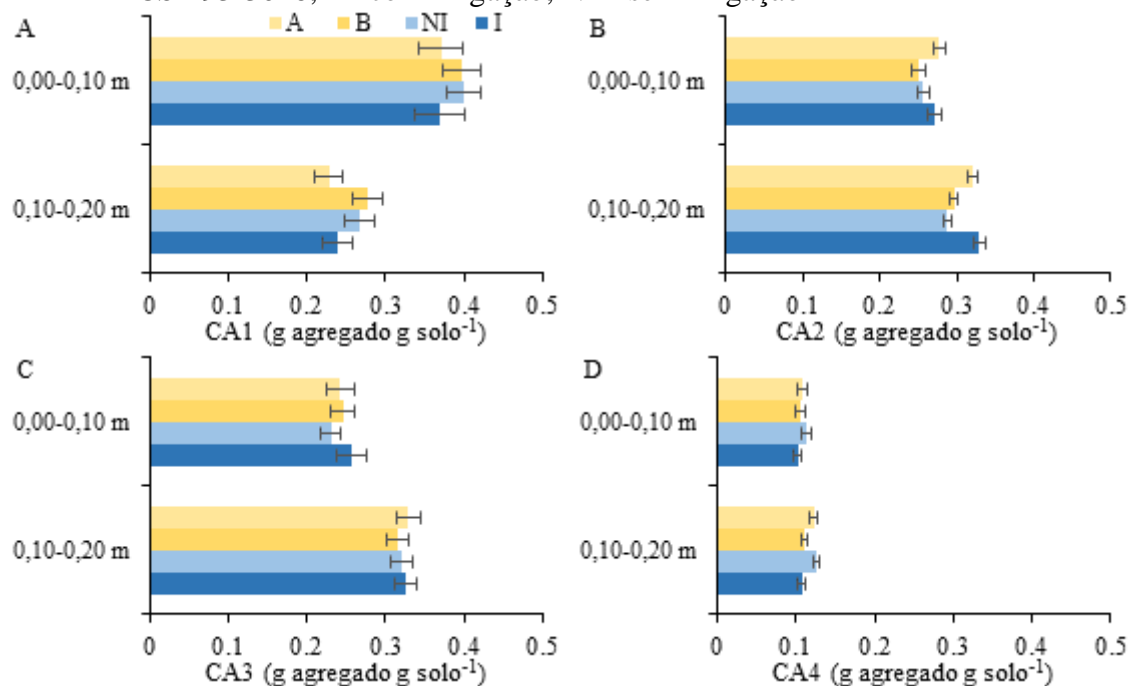
Para o IEA, observou-se semelhança dos valores das áreas entre as camadas de

solo avaliadas. Além disso, nas duas camadas a área irrigada apresentou maior IEA do que a área não irrigada, com valores 5,1% e 7,1% superiores nas camadas 0,00 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m, respectivamente. Para nenhuma das camadas de solo avaliadas, foram observadas diferenças relevantes no IEA entre as cultivares de cana-de-açúcar.

Nas classes de agregados, verificou-se que a camada 0,00 - 0,10 m apresentou maior massa de agregados na CA1, enquanto a camada 0,10 - 0,20 m apresentou as maiores massas de agregados para as classes de agregados CA2 e CA3. Na CA4, os valores de massa de agregados entre as

camadas foram semelhantes para todas as áreas.

Figura 2. Distribuição de agregados nas classes de agregados (CA). CA1: 6,3-4,0 mm (A); CA2: 4,0-1,0 mm (B); CA3: 1,0-0,5 mm (C) e CA4: < 0,5 mm (D). A – CTC 4; B – IACSP 93-3046; I – com irrigação; NI – sem irrigação



Fonte: Os autores (2021)

Comparando as áreas dentro das camadas, pode-se destacar para a classe de agregados de maior diâmetro (CA1) diferenças entre as cultivares na camada 0,10 - 0,20 m, com maiores valores para a cultivar IACSP93-3046. Na CA2, a cultivar CTC 4 apresentou massa de agregados superior a cultivar IACSP93-3046 nas duas camadas do solo, enquanto a área irrigada apresentou maior massa de agregados do que a área não irrigada na camada 0,10 - 0,20 m. Na CA3 não foram observadas diferenças entre as áreas para nenhuma das camadas de solo avaliadas, enquanto na menor classe de agregados (CA4) ocorreu maior massa de agregados nas áreas com a cultivar CTC 4 e não irrigadas na camada 0,10 - 0,20 m.

A maior “Dimensão de agregados” da camada 1 está associada diretamente às variáveis DMP, COP e CA1 (Tabela 1). Observa-se na literatura que o carbono orgânico é um dos principais agentes

cimentantes do solo que formam os agregados (SEBEN JÚNIOR; CORÁ; LAL, 2016), sendo verificado no presente estudo que, em função do fracionamento físico, o COP esteve mais associado à “Dimensão de agregados”. O COP é a fração do carbono orgânico concatenada ao manejo de solo, sendo menos estável que o COAM, que está concatenado à fração argila do solo. Maiores valores de COP na camada superficial (0,00 - 0,10 m) se devem a fatores como a presença elevada de material orgânico na superfície e em camadas mais superficiais do solo, como raízes e palhada, provenientes do ciclo e da colheita da cana-de-açúcar, e à maior atividade microbiana do solo nessa camada (STONE; FOREST; PLANT, 2014).

Avaliando a produção de palhada no segundo ano agrícola pelas cultivares de cana-de-açúcar utilizadas no presente estudo, Coelho *et al.* (2018b) observaram valores de até 12 t ha⁻¹ de palhada

proveniente dos ponteiros e do colmo da cana-de-açúcar. Assim, a quantidade de palhada de cana-de-açúcar acumulada sobre a superfície do solo durante os 4 anos anteriores da realização do presente estudo, juntamente com a presença de maior quantidade de raízes da cultura em camadas de solo mais superficiais (SOUSA *et al.*, 2013), associadas a maior atividade microbológica na superfície do solo para a degradação desses resíduos, promovem maior COP na camada 0,00 - 0,10 m, variável que afeta diretamente a formação de agregados maiores (Tabela 1).

Avaliando a agregação de um Latossolo sob sistemas de cultivo de milho e soja, Seben Júnior, Corá e Lal (2016) observaram que o COP foi a fração do CO que promoveu o aumento do tamanho de agregados do solo. Entretanto, os autores observaram que, embora significativa, a correlação entre o COP e o DMP do solo foi baixa (0,32), provavelmente devido à elevada quantidade de óxidos de Fe e Al presentes nos solos tropicais, como o Latossolo do presente estudo. Segundo Oades e Waters (1991), os elevados teores de óxidos em Latossolos limitam a explicação da teoria hierárquica de agregados, em que o carbono orgânico promove o aumento do tamanho de agregados, pois os óxidos são os principais agentes estabilizadores e de formação dos agregados nesse tipo de solo. Assim como no trabalho de Seben Júnior, Corá e Lal (2016), observou-se no presente estudo que, embora significativo, ocorreu baixa correlação do COP (0,631) com o processo “Dimensão de agregados” (Tabela 1).

Além da diferença entre camadas, observou-se diferenças entre cultivares para o processo 1, com maior “Dimensão de agregados” para a área com a cultivar IACSP93-3046, responsiva à irrigação (Tabela 3). A maior “Dimensão de agregados” na área com a cultivar IACSP93-3046 está associada a maior produção de palhada da cultivar IACSP93-3046 e,

possivelmente, a diferenças na morfologia do sistema radicular entre as cultivares avaliadas.

Avaliando a produção de palhada pelas cultivares de cana-de-açúcar utilizadas no segundo corte do presente estudo, Coelho *et al.* (2018b) não observaram diferenças na produção de palhada entre as cultivares CTC 4 e IACSP 93-3046 cultivadas sem irrigação. Entretanto, no manejo irrigado os autores observaram que a cultivar IACSP93-3046, responsiva à irrigação, apresentou maior produção de palhada em relação à cultivar CTC 4, com valor médio 26% superior. Ressalta-se que a cultivar IACSP93-3046 foi responsiva à irrigação, ou seja, aumentou sua produtividade quando irrigada, enquanto a cultivar CTC 4 não apresentou diferenças de produtividade quando irrigada ou não (COELHO *et al.*, 2018a; FISCHER FILHO, 2018).

Essas diferenças na responsividade das cultivares pode estar associada à diferentes distribuições do sistema radicular dessas cultivares. Verifica-se que cultivares de cana-de-açúcar pouco responsivas à irrigação apresentam sistema radicular mais distribuído em profundidade, sendo mais tolerantes ao déficit hídrico (LANDELL; BRESSIANI, 2008). Essas cultivares tendem a apresentar baixa resposta à irrigação em regiões com precipitações elevadas, como no presente estudo, em que a precipitação anual média é de 1.425 mm. Entretanto, cultivares que têm maior distribuição radicular nas camadas mais superficiais do solo tendem a apresentar maior resposta à irrigação, pois são menos tolerantes ao déficit hídrico e, nessas condições, apresentam menor produtividade.

Avaliando a densidade e distribuição radicular de cultivares de cana-de-açúcar, Landell e Bressiani (2008) observaram que a cultivar IACSP93-3046 apresentou maior densidade de raízes na camada 0,00 - 0,20 m ($1,62 \text{ g dm}^{-3}$) dentre as seis cultivares analisadas. Esse valor foi mais de 100%

superior em relação às duas cultivares com menor densidade de raízes na camada 0,00 - 0,20 m. Isso demonstra a elevada densidade de raízes dessa cultivar na camada superficial do solo, ajudando a justificar a elevada responsividade desse genótipo à irrigação. Além disso, como a cana-de-açúcar apresenta renovação de raízes ao longo do ano e dos ciclos de cultivo, a quantidade de raízes deixada no solo, juntamente com a maior quantidade de palhada dessa cultivar em relação à cultivar CTC 4 (COELHO *et al.*, 2018b), promoveu maior “Dimensão de agregados” nas áreas com a cultivar IACSP93-3046.

Além do COP, a maior “Dimensão de agregados” nas áreas com a cultivar IACSP93-3046 pode estar relacionada a outros fatores (Tabelas 1 e 3). Verifica-se que a formação de agregados maiores não é somente associada ao aumento dos teores de COP, principalmente em solos oxidícos, estando associada também aos exsudatos liberados pelas raízes e à atividade microbiana, por meio da formação de hifas e liberação de polissacarídeos provenientes do metabolismo dos microrganismos (SIX *et al.*, 2004; MELLONI; MELLONI; VIEIRA, 2013; SEBEN JÚNIOR; CORÁ; LAL, 2016). Assim, a maior quantidade de palhada produzida nas áreas com a cultivar IACSP93-3046 em relação às áreas com a cultivar CTC 4 (COELHO *et al.*, 2018b) possivelmente promoveram maior atividade microbiana nas áreas com essa cultivar, ajudando a formação de agregados maiores. Zhao *et al.* (2019) observaram que ocorreu maior atividade microbiológica no solo quanto maior foi a quantidade de palhada sobre a superfície do solo, aumentando o número de hifas e a produção de exsudatos, como os polissacarídeos, auxiliando no processo de agregação do solo. Além disso, prováveis maiores quantidades de raízes da cultivar IACSP93-3046 nas camadas superficiais do solo (LANDELL; BRESSIANI, 2008) em relação à cultivar CTC 4 pode promover maior liberação de

exsudatos que auxiliam na formação de agregados, além de maior quantidade de material orgânico que pode gerar maior atividade microbiológica nas áreas com essa cultivar.

Como nenhum dos atributos provenientes do fracionamento físico do carbono orgânico foram significativos no processo 2 (Tabela 1), a maior “Estabilidade de agregados” nas áreas irrigadas (Tabela 3) pode ser explicada pelos ciclos de umedecimento e secagem do solo. A irrigação na cana-de-açúcar gera ciclos de umedecimento e secagem no solo durante todo o ano, promovendo maior coesão entre as partículas do solo em áreas irrigadas em relação a áreas não irrigadas.

Pires e Bacchi (2010) observaram, através de tomografia computadorizada, que ciclos de umedecimento e secagem promovem maior aproximação e coesão das partículas do solo, podendo aumentar a estabilidade dos agregados em áreas irrigadas. Adicionalmente, áreas irrigadas tendem a apresentar maior atividade microbiana do que áreas não irrigadas, pois a umidade do solo fica próxima à umidade na capacidade de campo durante o ano todo (GONG *et al.*, 2015). Dessa maneira, a maior atividade microbiológica de áreas irrigadas gera maior liberação de exsudatos e hifas em relação a áreas não irrigadas, auxiliando na maior estabilidade de agregados em água (SIX *et al.*, 2004).

Campos, Pires e Costa (2020) avaliando o teor de carbono orgânico em solos de textura média (200 g kg⁻¹ de argila) em áreas com e sem irrigação após 20 anos de uso desses sistemas observaram que, após esse período, o teor de carbono orgânico das áreas irrigadas foi semelhante à vegetação nativa da região, enquanto nas áreas não irrigadas os valores foram até 30% inferiores à vegetação nativa. Segundo os autores isso ocorre, pois nas áreas irrigadas há maior produção de biomassa total das culturas, promovendo maior quantidade de material orgânico que será convertido em carbono

orgânico no solo. Por se tratar de um solo de textura média (200 g kg⁻¹ de argila), manejos agrícolas que aumentam a produção de biomassa no sistema, como a irrigação, incrementam mais facilmente o teor de carbono do solo do que áreas com solos mais argilosos, como no presente estudo, em que não se observaram diferenças relevantes no COP e COAM do solo entre os tratamentos avaliados (Figura 1). Isso pode ter ocorrido em solo argiloso, pois, embora áreas irrigadas apresentem maior produção de biomassa total, a condição de umidade do solo é mais favorável para a degradação dos resíduos das culturas. Também, solos argilosos tendem a apresentar maior equilíbrio natural entre as saídas e entradas de carbono orgânico, necessitando de quantidades mais elevadas de material orgânico para elevar o seu teor de carbono orgânico do que solos arenosos e de textura média.

O processo relacionado ao tamanho dos agregados, denominado “Dimensão de agregados”, apresentou correlação direta do COP, ou seja, quanto maior o COP do solo, maior a “Dimensão de agregados”, enquanto o processo denominado “Estabilidade de agregados” não apresentou nenhuma variável relacionada ao carbono orgânico do solo. Isso demonstra que para solos oxídicos

6 CONCLUSÃO

A irrigação e a definição correta de cultivares é essencial para gerar maior agregação e, conseqüentemente, maior conservação do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. A irrigação subsuperficial promove maior estabilidade dos agregados em áreas cultivadas com cana-de-açúcar em solo de textura argilosa. Cultivares de cana-de-açúcar proporcionam

como o do presente estudo (Latosolo), o COP é fundamental para o aumento no processo “Dimensão de agregados” do solo, mas não para o processo “Estabilidade de agregados”. Oades e Waters (1991) observaram que em solos mais intemperizados, como os Latossolos, os óxidos de Fe e Al são os principais agentes estabilizadores dos agregados do solo, diferentemente do que ocorrem em solos menos intemperizados, em que o CO é fundamental para a formação e estabilidade dos agregados do solo.

A escolha adequada da cultivar de cana-de-açúcar e a irrigação são manejos agrícolas fundamentais para a conservação do solo. Isso ocorre, pois a escolha adequada da cultivar atua diretamente na formação de agregados maiores, auxiliando na estruturação, retenção e infiltração de água no solo, o que pode maximizar a eficiência de irrigação e reduzir a quantidade de água a ser aplicada. Adicionalmente, há maior sequestro de carbono no solo, reduzindo a emissão de CO₂ para a atmosfera. A irrigação promove maior estabilidade dos agregados, auxiliando no controle da erosão em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, visto que os agregados apresentam maior resistência aos manejos agrícolas e ao impacto das gotas de chuva.

diferenças na agregação do solo, sendo que a cultivar responsiva à irrigação (IACSP93-3046) promove maior agregação do solo do que a cultivar não responsiva (CTC 4).

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de iniciação científica à primeira autora.

8 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Fao, 1998. v. 300, n. 9. (Irrigation and Drainage paper, 56).
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Levantamento da cana-de-açúcar irrigada na região centro-sul do Brasil**. Relatório síntese. Brasília, DF: ANA, 2017.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992.
- CAMPOS, R.; PIRES, G. F.; COSTA, M. H. Soil carbon sequestration in rainfed and irrigated production systems in a new Brazilian agricultural frontier. **Agriculture**, Basel, v. 10, n. 5, p. 156-169, 2020.
- CANA-DE-AÇUCAR. **Acompanhamento da Safra Brasileira: cana-de-açúcar**, Brasília, DF, v. 7, n. 2, p. 11-16, ago. 2020. Safra 2020/2021, Segundo levantamento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar?limitstart=0>. Acesso em: 4 nov. 2020.
- 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 multiapproach assessment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 184, n. 1, p. 301-309, 2018.
- CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 267, n. 1, p. 156-168, 2016.
- COELHO, A. P.; DALRI, A. B.; FARIA, R. T.; LANDELL, E. P. A.; PALARETTI, L. F.; ZANINI, J. R.; ZERBATO, C. Productivity and technological quality of sugarcane cultivars fertigated and planted through pre-sprouted seedlings. **Australian Journal of Crop Science**, Lismore, v. 12, n. 8, p. 1265-1271, 2018a.
- COELHO, A. P.; TITTOTO, S.; DALRI, A. B.; FARIA, R. T.; LANDELL, E. P. A. Produção de palhada de cultivares de cana-de-açúcar sob regimes hídricos. **Ciência & Tecnologia**, Jaboticabal, v. 10, número especial, p. 17-21, 2018b.
- DALRI, A. B.; CRUZ, R. L. Efeito da frequência de irrigação subsuperficial por gotejamento no desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Irriga**, Botucatu, v. 7, n. 1, p. 29-34, 2002.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

- FISCHER FILHO, J. A. **Resposta de cultivares de cana-de-açúcar a lâminas de irrigação via gotejamento subsuperficial**. 2018. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2018.
- GONG, J. R.; XU, S.; WANG, Y.; LUO, Q.; LIU, M.; ZHANG, W. Effect of irrigation on the soil respiration of constructed grasslands in Inner Mongolia, China. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 395, n. 1, p. 159-172, 2015.
- HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Data multivariate analysis**. Porto Alegre, RS: Bookman Editora, 2009.
- KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, Nova Iorque, v. 23, n. 3, p. 187-200, 1958.
- LANDELL, M. G. A.; BRESSIANI, J. A. Melhoramento Genético, caracterização e manejo varietal. *In*: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Eds.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC. 2008.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Registro Nacional de Cultivares**. Brasília: MAPA, 2020. Disponível em: https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php. Acesso em: 4 nov. 2020.
- MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P.; VIEIRA, L. L. Uso da terra e a qualidade microbiana de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1678-1688, 2013.
- MILSTEIN, A.; ISLAM, M. S.; WAHAB, M. A.; KAMAL, A. H. M.; DEWAN, S. Characterization of water quality in shrimp ponds of different sizes and with different management regimes using multivariate statistical analysis. **Aquaculture International**, Dordrecht, v. 13, n. 6, p. 501-518, 2005.
- NICOLOSO, R. S.; AMADO, T. J. C.; RICE, C. W. Assessing strategies to enhance soil carbon sequestration with the DSSAT-Century model. **European Journal of Soil Science**, Chichester, v. 71, n. 6, p. 1-16, 2020.
- NIMMO, J. R.; PERKINS, K. S. Aggregate stability and size distribution. *In*: DANE, J. H. TOPP, G. C. (ed.). **Methods of soil analysis**. Part 4. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 317-328.
- OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 73, n. 1-3, p. 309-337, 1984.
- OADES, J. M.; WATERS, A. G. Aggregate hierarchy in soils. **Soil Research**, Clayton, v. 29, n. 6, p. 815-828, 1991.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S. Mudanças na estrutura do solo avaliada com uso de tomografia computadorizada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 45, n. 4, p. 391-400, 2010.

PRADO, H. **Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil**. Piracicaba: Encarte Informações Agronômicas, 2005. (n. 110).

SEBEN JÚNIOR, G. F.; CORÁ, J. E.; LAL, R. Soil aggregation according to the dynamics of carbono and nitrogen in soil under diferente cropping systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 15, n. 9, p. 1652-1659, 2016.

SILVA, A. P. J. N.; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 579-585, 2006.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro) agregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 7-31, 2004.

SOUSA, A. C. M.; MATSURA, E. E.; ELAIUY, M. L. C.; SANTOS, L. N. S.; MONTES, C. R.; PIRES, R. C. M. Root system distribution of sugarcane irrigated with domestic sewage effluent application by subsurface drip system. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 4, p. 647-657, 2013.

STONE, M. M.; FOREST, J. L.; PLANTE, A. F. Changes in extracellular enzyme activity and microbial community structure with soil depth at the Luquillo Critical Zone Observatory. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 75, n. 1, p. 237-247, 2014.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Nova Iorque, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.

ZHAO, S.; QIU, S.; XU, X.; CIAMPITTI, I. A.; ZHANG, S.; HE, P. Change in straw decomposition rate and soil microbial community composition after straw addition n different long-term fertilization soils. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 138, n. 1, p. 123-133, 2019.