

JUAN ALBERTO MARTINEZ ORTIZ

**PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO EM SISTEMA PLANTIO
DIRETO: ASSOCIAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DA SOJA
E VARIAÇÕES EM RELAÇÃO À MATA NATIVA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Ciência do Solo, do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Dr. Álvaro Luiz Mafra

Co-orientador: Dr. Jackson Adriano Albuquerque

LAGES, SC

2019

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Ortiz, Juan Alberto Martinez

Propriedades físicas do solo em sistema plantio direto :
associação com a produtividade da soja e variações em relação à
mata nativa / Juan Alberto Martinez Ortiz. -- 2019.

71 p.

Orientador: Álvaro Luiz Mafra

Coorientador: Jackson Adriano Albuquerque

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Ciência Do Solo, Lages, 2019.

1. Produtividade de soja. 2. Sistema plantio direto. 3.
Propriedades físicas do solo. 4. Carbono orgânico do solo. I. Mafra,
Álvaro Luiz. II. Albuquerque, Jackson Adriano. III. Universidade do
Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,
Programa de Pós-Graduação em Ciência Do Solo. IV. Título.

JUAN ALBERTO MARTINEZ ORTIZ

**PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO:
ASSOCIAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DA SOJA E VARIAÇÕES EM
RELAÇÃO À MATA NATIVA**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina no Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ciência do Solo.

Banca Examinadora:

Orientador: _____
Prof. Dr. Álvaro Luiz Mafra
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membro: _____
Dr. Diego Bortolini
Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE

Membro: _____
Dr. Alvadi Antonio Balbinot Junior
EMBRAPA SOJA – LONDRINA, PR

**27 de fevereiro, 2019
LAGES, SC**

Ñande yvy ha'e ñande rekove.

Ñamomba'ékena ñande rekove.

Nosso solo é nossa vida. Valorizemos
nossa vida.

AGRADECIMENTOS

A meu orientador, professor Álvaro Mafra pela oportunidade de crescimento e orientação brindada. Ao programa de Pos-Graduação em Ciência do solo.

A minha companheira de vida Sabrina pelo suporte e apoio constante.

Ao CAPES pela bolsa. À fundação AGRISUS pelo financiamento do projeto.

Aos companheiros, Elston e Mayara por todo o apoio.

Aos companheiros do laboratório de Física e Manejo de solos.

Em fim, agradeço a Deus, a minha família e a todos os que fizeram possível este processo.

RESUMO

Ortiz, Juan Alberto Martinez **PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO: ASSOCIAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE DA SOJA E VARIAÇÕES EM RELAÇÃO À MATA NATIVA**. 2019. 71 p. Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Área de Concentração: Manejo do Solo. Universidade do Estado de Santa Catarina – Centro de Ciências Agroveterinárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2019.

A produtividade de grãos de soja (*Glycine max* L.) cultivada em sistema plantio direto pode ser afetada por atributos do solo relacionados à estrutura em virtude da compactação. O objetivo foi avaliar a relação entre atributos físicos do solo e a produtividade da soja em sistema plantio direto. O solo foi avaliado na camada 0-10 cm em áreas de lavouras sob sistema plantio direto adjacentes entre si e em áreas de mata nativa próximas a estas, em três microrregiões diferentes, abrangendo duas zonas climáticas segundo a classificação de Köppen: Chapecó com clima *Cfa*; Campo Erê e Faxinal dos Guedes com clima *Cfb*. Considera-se que as áreas de lavoura apresentam um histórico de variação de produtividade, alta, média e baixa, conforme relatado pelos produtores. As variáveis analisadas foram: densidade do solo, porosidade total, macroporos, bioporos, microporos condutividade hidráulica saturada e resistência do solo à penetração, a partir de amostras coletadas em anéis volumétricos na camada de 0-5 cm e 5-10 cm. Também foi avaliada a textura, argila dispersa em água, estabilidade de agregados em água, carbono orgânico total e particulado, estes na camada de 0-10 cm, e produtividade em grãos da soja nos mesmos pontos de coleta do solo. Os dados foram submetidos à análise de variância e teste de Tukey (5%), correlação linear múltipla *stepwise* (5%) e análise de componentes principais (ACP). Houve diferença de produtividade em grãos da soja apenas em Faxinal dos Guedes, que coincidiu com a produtividade estimada das áreas. Em Campo Erê, o volume de microporos e condutividade hidráulica saturada, ambas da camada 5-10 cm, tiveram melhor relação e explicaram 39,5 % da produtividade da soja, provavelmente relacionada à infiltração e redistribuição de água no solo. Em Faxinal dos Guedes, a massa de carbono orgânico associado aos minerais em macroagregados e estoque de carbono orgânico associado aos minerais em macroagregados explicaram 30,8 % a produtividade da soja, que pode ser devido à importância desta fração para a acumulação de carbono orgânico no solo. Não houve variáveis explicativas para a produtividade da soja em Chapecó. As variações nas propriedades físicas do solo nas áreas de lavoura em relação às áreas de mata nativa, foram relacionadas a aumentos da densidade do solo e resistência do solo à penetração, e diminuições da porosidade total, macroporos e bioporos, o que foi mais expressivo na camada de 5-10 cm. Na ACP, observou-se associação de agregados maiores com as áreas de lavoura. Os níveis de compactação observados não afetaram a produtividade em grãos da soja.

Palavras-chave: Produtividade em grãos da soja, Sistema plantio direto, Propriedades físicas do solo, Carbono orgânico do solo.

ABSTRACT

Ortiz, Juan Alberto Martinez **SOIL PHYSICAL PROPERTIES UNDER NO TILLAGE SYSTEM: RELATIONSHIP WITH SOYBEAN YIELDS AND CHANGES IN RELATION TO THE NATIVE FOREST.** 2019. 71 p. Master's Dissertation in Soil Science. Area of Concentration: Soil Management. Santa Catarina State University - Agroveterinary Sciences Center. Graduate Program in Soil Science, Lages, 2019.

Soybean yields (*Glycine max* L.) under no-tillage system can be affected by soil properties related to the structure due to compaction. The objective was to evaluate the relationship between soil physical properties and soybean yields under no tillage system. Soil was evaluated in the 0-10 cm layer in adjacent agricultural areas under no tillage and in native forest areas close to them, in three different microregions, covering two climatic zones according to Köppen classification: Chapecó with Cfa climate; Campo Erê and Faxinal dos Guedes with Cfb climate. It is considered that the agricultural areas present a history of yield variation, high, medium and low, as reported by the producers. The variables analyzed were soil density, total porosity, macropores, biopores, micropores, saturated hydraulic conductivity and soil resistance to penetration, from samples collected in volumetric rings in the layers 0-5 cm and 5-10 cm. It was also evaluated the texture, dispersed clay in water, aggregate stability in water, total and particulate organic carbon, these in the 0-10 cm layer, and soybean grain yield in the same collection points of the soil. Data were submitted to analysis of variance and Tukey test (5%), multiple stepwise linear correlation (5%) and principal component analysis (PCA). There was a difference in soybean grain yields only in Faxinal dos Guedes, which coincided with the estimated yields of the areas. In Campo Erê, the volume of micropores and saturated hydraulic conductivity, both of the layer 5-10 cm, explained 39.5% of the soybean yield, probably related to the infiltration and redistribution of water in the soil. In Faxinal dos Guedes, the organic carbon mass associated to the minerals in macroaggregates and organic carbon stock associated to the minerals in macroaggregates explained 30.8% of the soybean yield, which may be due to the importance of this fraction for the accumulation of organic carbon in the soil. There were no explanatory variables for soybean yield in Chapecó. Variations in soil physical properties in these crop areas in relation to native forest were related to increases in soil density and soil resistance to penetration, and decreases in total porosity, macropores and biopores, that were more significant in the 5 -10 cm. In the PCA, it was observed an association of larger aggregates with the cropping areas. The compaction levels observed did not affect soybean yield.

Key-words: Soybean yield, No tillage system, Soil physical properties, Soil organic carbon.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Localização das áreas de estudo. Tipo de clima e localização dentro do Brasil, (a) zona agroecológica, (b) região do estado e localização dos municípios.37
- Figura 2 – Dados de precipitação (mm), temperatura máxima, mínima e média (°C), com base nos dados da EPAGRI/CEPAF/CHAPECÓ e INMET.39
- Figura 3 – Desenho representativo dos pontos de coleta das áreas de lavoura e mata nativa. .40
- Figura 4 – Análise de componentes principais (ACP) a partir das variáveis do solo, nas áreas de lavoura e mata nativa do município Faxinal dos Guedes. Densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporos (Macro), bioporos (Bio), microporos (Micro), agregados de classe 1 (Clas1), agregados de classe 2 (Clas2), agregados de classe 3 (Clas3), agregados de classe 4 (Clas4), agregados de Classe 5 (Clas5), resistência do solo à penetração (RSP), areia (Ar), silte (Sil), argila (Arg), argila dispersa em água (ADA).53
- Figura 5 – Análise de componentes principais (ACP) a partir das variáveis do solo, nas áreas de lavoura do município Campo Erê. Densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporos (Macro), bioporos (Bio), microporos (Micro), agregados de classe 1 (Clas1), agregados de classe 2 (Clas2), agregados de classe 3 (Clas3), agregados de classe 4 (Clas4), agregados de Classe 5 (Clas5), condutividade hidráulica saturada (CH), resistência do solo à penetração (RSP), areia (Ar), silte (Sil), argila (Arg), argila dispersa em água (ADA)..... 55
- Figura 6 – Análise de componentes principais (ACP) a partir das variáveis do solo, nas áreas de lavoura e mata nativa do município Chapecó. Densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporos (Macro), bioporos (Bio), microporos (Micro), agregados de classe 1 (Clas1), agregados de classe 2 (Clas2), agregados de classe 3 (Clas3), agregados de classe 4 (Clas4), agregados de Classe 5 (Clas5), condutividade hidráulica saturada (CH), resistência do solo à penetração (RSP), areia (Ar), silte (Sil), argila (Arg), argila dispersa em água (ADA)..... 56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Médias de produtividade de grãos de soja (kg ha^{-1}) das áreas na safra 2017/2018.45

Tabela 2 – Média das variáveis avaliadas na camada 0-10 cm: argila dispersa em água (ADA), densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporos (Macro), bioporos (Bio), microporos (Micro), resistência do solo à penetração (RSP), condutividade hidráulica saturada (CH), agregados de classe 1 (Class1), agregados de classe 2 (Class2), agregados de classe 3 (Class3), agregados de classe 4 (Class4), agregados de Classe 5 (Clase5), carbono orgânico do solo (COS) nas áreas de Produtividade Alta (PA), Produtividade Média (PM), Produtividade Baixa e mata nativa (MN).48

Tabela 3 – Média das frações granulométricas de carbono da camada 0-10 cm: massa de carbono orgânico particulado de macroagregados (MasCOPmac), massa de carbono orgânico total de macroagregados (MasCOTmac), massa de carbono orgânico associado aos minerais de macroagregados (MassCAMmac), carbono orgânico particulado de macroagregados (COPmac), carbono orgânico de macroagregados (COMac), carbono orgânico associado aos minerais de macroagregados (CAMmac), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (CAM) nas áreas de Produtividade Alta (PA), Produtividade Média (PM), Produtividade Baixa e mata nativa (MN).50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	SISTEMA PLANTIO DIRETO	23
2.2	PRODUÇÃO DE SOJA	23
2.3	PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E SEU EFEITO NA PRODUÇÃO DA SOJA.....	24
2.4	COMPACTAÇÃO DO SOLO	27
2.5	ESTRUTURA DO SOLO	29
3	HIPÓTESE.....	33
4	OBJETIVOS	35
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
5.1	ÁREA DE ESTUDO	37
5.2	AMOSTRAGEM E ANÁLISES.....	39
5.3	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	43
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
6.1	PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE SOJA.....	45
6.2	PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE SOJA E PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO ...	46
6.2	PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO EM ÁREAS DE LAVOURA E MATA NATIVA.....	51
7	CONCLUSÕES.....	57
8	APÊNDICES	69

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) é a principal cultura agrícola no Brasil, sendo cultivada nas mais variadas condições ambientais. Sua distribuição dentro do território nacional está associada com variações nas características do solo, o que pode determinar alterações na expressão de sua capacidade produtiva. Por essa razão, é importante identificar as propriedades do solo relacionadas às altas produtividades desta espécie.

A soja pode apresentar variabilidade espacial de produtividade em uma mesma região, inclusive em áreas adjacentes não relacionadas à planta, que podem ser atribuídas às características do solo (ANTHONY et al., 2012).

No sistema plantio direto, a contínua entrada de resíduo e mínimo revolvimento do solo permitem a acumulação de matéria orgânica, que pode melhorar a estrutura do solo. Essa melhora estrutural, com grande impacto na qualidade física do solo, pode significar aumentos consistentes de produtividade da soja nas áreas de lavoura sob sistema plantio direto.

O potencial de acumulação de carbono orgânico do solo pode diferir com as condições climáticas e características do solo. Em regiões mais frias pode haver maior potencial de acumulação de carbono orgânico, devido a uma menor taxa de decomposição. Por essa razão é importante considerar esses aspectos, já que a cultura da soja no país ocorre em diversas regiões, com variadas condições climáticas e características do solo.

O potencial aumento da qualidade estrutural do solo sob sistema plantio direto pode ser afetado pelo tráfego de máquinas em condições de umidade inadequadas (RICHART et al., 2005), desfavorecendo a expressão do potencial produtivo da soja, que ocorrem devido à alteração de atributos físicos relacionados à dinâmica de distribuição de água e ar, comumente denominada de compactação, especialmente na camada superficial do solo (REICHERT et al., 2007). Sabendo que as restrições por compactação do solo nesse sistema ocorrer em geral na camada superficial do solo, é esperado que esses impedimentos ao crescimento radicular podem comprometer a expansão e aprofundamento das raízes, afetando o potencial produtivo da soja.

Segundo KLUTHCOUSKI et al. (2000), a soja apresenta boa adaptabilidade ao sistema plantio direto, onde pode haver concentração superficial nutrientes e sendo assim, a compactação pode afetar a nutrição da soja, dificultando o acesso aos nutrientes, principalmente aqueles de baixa mobilidade. Da mesma forma, a diminuição da fixação

biológica de nitrogênio e mineralização da matéria orgânica, em consequência da compactação (SICZECK & LIPIEC, 2011; CALONEGO et al., 2017), podem afetar os rendimentos da soja. Esses aspectos relacionados às propriedades físicas do solo e que afetam a produtividade da soja, podem ser estudados por indicadores que mensuram a qualidade física do solo. Exemplos desses indicadores podem ser: a porosidade, resistência à penetração, estabilidade de agregados, densidade do solo, entre outros (RICHART et al., 2005). VEZZANI & MIELNICKZUK (2009), mencionam que a qualidade do solo é a capacidade do solo de um solo de funcionar para sustentar a produtividade das plantas e animais, e manter ou aumentar a qualidade ambiental. Por outra parte, esses autores relatam que o solo por si só não atinge qualidade, e sim o sistema solo-planta, incluindo organismos do solo integrados e adaptados ao seu local no ambiente. Nesse contexto, a qualidade física do solo é atingida quando os valores desses indicadores representam ótimas condições para o desenvolvimento radicular e dos organismos do solo.

A matéria orgânica do solo é recomendada como indicador para avaliar a qualidade física do solo, fundamentada no fato de que as funções e processos biológicos, químicos e físicos estarem relacionadas diretamente com a presença da matéria orgânica (VEZZANI & MIELNICKZUK, 2009). No tocante aos atributos físicos, ela interfere na arquitetura do solo por meio da participação na formação de unidades estruturais (DEXTER et al., 2008), que aumentam a capacidade de suporte do solo, quando são aplicadas pressões sobre a superfície do solo, e pode interferir na retenção e infiltração de água no perfil do solo (DE OLIVEIRA et al., 2018). A matéria orgânica do solo pode ser representada pelo carbono orgânico do solo cuja abordagem pode dar-se através de suas frações, que podem ser químicas ou físicas.

Um aspecto relevante do carbono orgânico do solo no sistema plantio direto é sua importância na provisão de nutrientes à cultura, que ocorre através do processo de decomposição de resíduos orgânicos, que provêm dos componentes vegetais que formam parte do sistema de diversificação adotado. Esse processo de decomposição dos resíduos orgânicos em uma primeira fase envolve a fração física de carbono orgânico, que é biologicamente mais ativa e, em cujo processo de decomposição, pode ocorrer liberação de nutrientes, enquanto que a fração mais estabilizada, que pode ocorrer em uma etapa mais avançada de decomposição, tem maior relevância do ponto de vista da reatividade física e química no solo (GALANTINI & SUÑER, 2008), importante para a retenção de nutrientes no solo. Assim, em lavouras sob sistema plantio direto, o fracionamento físico de carbono orgânico, baseado na transformação física dos resíduos durante o processo de decomposição, pode estar relacionada à produtividade da soja, dada sua importância no fornecimento de

nutrientes e na estruturação do solo (GALANTINI & SUÑER, 2008; DE OLIVEIRA et al., 2018).

Uma das vias para a avaliação da qualidade física do solo em áreas de lavoura sob sistema plantio direto é pela comparação com áreas de mata nativa. O efeito do tráfego e teor de carbono orgânico do solo podem ser determinantes para identificar essa variação. Em lavouras sob sistema de plantio direto o diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis em água pode diferir em relação à mata nativa. A proteção física de carbono orgânico particulado, influenciada pelo tráfego e não revolvimento do solo, favorece a estabilização e acumulação de carbono orgânico do solo (BRIEDIS et al., 2018). Essa condição, que pode ser mais acentuada na camada superficial do solo, provavelmente seja a causa de aumento de produtividade da soja em áreas sob sistema plantio direto, tendo assim potencial de explicar variações de produtividade nesse sistema.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SISTEMA PLANTIO DIRETO

O sistema plantio direto envolve um conjunto de práticas de manejo de solo destinado ao gerenciamento de sistemas agrícolas produtivos, que compreende a mobilização do solo apenas na linha de semeadura, a manutenção permanente da cobertura do solo e a diversificação de espécies, via rotação e/ou consorciação de culturas (DENARDIN et al., 2014). Este sistema pode ser considerado como um dos componentes da agricultura conservacionista, que busca maior competitividade para o agronegócio, atender às necessidades socioeconômicas, garantir segurança e qualidade alimentar e manter respeito ao ambiente (DENARDIN et al., 2010).

O êxito da implementação deste sistema de manejo depende das características regionais como o clima, e das características do solo, tais como textura e mineralogia (SALTON et al., 1998). Na agricultura conservacionista, segundo DENARDIN et al (2010) o solo, sob enfoque funcional agrícola, constitui o ambiente natural onde se desenvolvem as plantas, atuando como elemento de suporte e de disponibilização de água e nutrientes, e determinante da produtividade em função de limitações de sua fertilidade.

2.2 PRODUÇÃO DE SOJA

O Brasil é um dos maiores produtores de soja a nível mundial. Com uma superfície e volume de produção para a safra 2017/2018 de 33,9 milhões de hectares e 113,9 milhões de toneladas, respectivamente, se posiciona em segunda posição mundial, atrás dos Estados Unidos (EMBRAPA, 2018). A soja é um dos principais produtos agrícolas e tem papel importante na economia do país, dada suas variadas formas de utilização em diferentes segmentos, assim, ela é fonte de proteína animal, na alimentação humana, cadeia agroindustrial e utilizada na fabricação de biocombustíveis (CONAB, 2017).

Segundo CONAB (2018), a produtividade da soja no Brasil vem aumentando nos últimos anos, situando-se a média nacional na safra 2017/2018 em torno a 3.382 kg ha⁻¹. No estado de Santa Catarina, a soja apresenta destacada importância econômica, sendo seu

cultivo mais concentrado na Região Oeste do estado, e a média de produtividade estimada para a safra 2017/2018 foi de 3.400 kg ha⁻¹ (ALVES & ELIAS, 2017).

O Desafio Nacional de Máxima Produtividade de Soja, realizado pelo Comitê Estratégico Soja Brasil (CESB) é um concurso de produtividade máxima em que elevados níveis de produtividade são observados, o que demonstra que o potencial produtivo da soja ainda está longe de ser alcançado, tendo em conta a produtividade média atual. O maior desafio é atingir esses níveis de produtividade de forma economicamente viável, o que implica conhecer as variáveis mais relevantes para o desenvolvimento da cultura, fazendo que esse ganho de produtividade seja consistente e generalizado (CONAB, 2017). A quantificação das diferenças nas propriedades do solo entre as áreas com diferencial produtivo de soja, pode ajudar a identificar quais propriedades contribuem mais para o potencial de produção da soja (ADAMS et al., 2018).

Em um estudo realizado nos Estados Unidos (KRAVCHENKO & BULLOCK, 2000), observou-se que as propriedades do solo explicaram cerca de 30% da variabilidade de rendimento da soja, sendo o conteúdo de matéria orgânica a que mais influenciou as expressões de produtividade. Isso é de suma importância tendo em conta as condições climáticas do Brasil (tropical e subtropical) e que a maioria das áreas são conduzidas sob plantio direto, cuja condução permite o acúmulo de matéria orgânica no solo.

A implantação desse sistema de manejo pode contribuir com a produtividade da soja, já que propicia o uso intensivo do solo, com menores oscilações de rendimentos e com menor impacto ambiental (CONAB, 2017). No entanto, o tráfego de máquinas em condições de umidade inadequadas pode gerar inconvenientes para a expressão plena do potencial produtivo da soja sob este sistema, o que pode ser observado por meio de indicadores relacionados à dinâmica da água e o ar no solo, que formam parte das propriedades físicas do solo (TORRES & SARAIVA, 1999; REICHERT et al., 2007; LOZANO et al., 2014).

2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E SEU EFEITO NA PRODUÇÃO DA SOJA

A importância de um ambiente radicular adequado está relacionada à provisão de água e oxigênio as raízes, as quais cumprem funções vitais para o desenvolvimento das plantas. Os processos de fotossíntese, transpiração, crescimento da copa e das raízes e respiração, que são simultâneos e mutuamente dependentes, sendo expressos pela relação solo-planta-água e envolvem o fluxo de carbono no sistema (HILLEL, 1998). Do ponto de vista agrônomo,

esses aspectos implicam o estudo dos atributos do solo, especialmente das propriedades físicas do solo para a obtenção de altas produtividades nas áreas de lavoura.

Os agregados são formados com a participação de partículas minerais, material orgânico, elementos químicos e organismos, e são determinantes na retenção e fluxo de água e ar no solo (HILLEL, 1998). O tamanho, forma e estabilidade em água dos agregados dependem dos agentes formadores e ligantes que atuaram na sua gênese (HILLEL, 1998; BRONICK & LAL, 2005). Os agregados podem criar condição física desejável para desenvolvimento ótimo da soja, permitindo a livre entrada e circulação de água e ar (HILLEL, 1998). Como é sabido, a absorção de água e nutrientes ocorre via sistema radicular, sendo então importante que as raízes estejam bem distribuídas. Para tanto, é necessário que não haja impedimento mecânico para o crescimento das raízes na camada superficial do solo. A camada superficial também é a zona mais ativa no solo de lavoura sob sistema plantio direto, dado o acúmulo preferencial de carbono orgânico nessa camada (TORRES & SARAIVA, 1999). O crescimento do sistema radicular da soja no solo ocorre em macroporos, dado a menor resistência à penetração das raízes e maior provisão de oxigênio às raízes (TORRES & SARAIVA, 1999). Durante os primeiros estádios de crescimento da soja, tanto o déficit quanto o excesso de água são prejudiciais para as plantas, sendo o excesso hídrico mais limitante do que o déficit (FARIAS et al., 2007), devido à deficiência de oxigênio, uma vez que poros de aeração são insuficientes. Por outro lado, a provisão de água às raízes depende da retenção de água no solo, que ocorre em poros menores (LIBARDI, 2005). Essa provisão é vital tendo em conta que a soja é cultivada na época de maior temperatura e taxa de transpiração das plantas. Assim, é indispensável que o solo tenha poros de retenção em volumes suficientes para suprir essa demanda. Vale destacar que a água e o ar ocupam o mesmo espaço no solo, o conteúdo de um afeta o outro, de modo que as proporções variam conforme a distribuição de tamanho de poros (LIBARDI, 2005).

Diversos autores afirmam que as operações de manejo nas lavouras sob sistema plantio direto podem reduzir a porosidade do solo, principalmente dos poros maiores, quando comparada a áreas de mata nativa e cultivo convencional (RICHART et al., 2005; DA SILVEIRA et al., 2008; WENDLING et al., 2012). Como o fluxo de água em solo saturado ocorre preferentemente em macroporos, estes são responsáveis pela aeração e drenagem de água (REICHERT et al., 2007), razão pela qual sua diminuição reduz a condutividade hidráulica e o acúmulo de água (RICHART et al., 2005). Tanto a retenção quanto o fluxo de

água são vitais para o desenvolvimento do cultivo, já que a água serve como veículo para a absorção de nutrientes e nos processos que envolvem a ciclagem de nutrientes (GALLARDO et al., 2009).

O benefício da inclusão de plantas de cobertura no sistema plantio direto está ligado, principalmente, à criação de poros biológicos de alta funcionalidade (REINERT et al., 2008). Também ajudam à formação de cavidades tipo canais e câmaras, que se formam por fatores externos à organização das partículas, ou seja, são oriundos da atividade biológica (LIMA et al., 2005). Estes poros possuem melhor conectividade e são importantes também para a nutrição das plantas, pela mobilização de nutrientes, especialmente aqueles absorvidos por fluxo de massa. Segundo LOZANO et al. (2014) esses poros podem diferir em estabilidade dependendo da textura do solo, observando que poros criados por raízes de milho foram mais resistentes em um solo franco, do que em um solo franco-arenoso. Os bioporos podem fazer que a conectividade da porosidade total do solo seja preferentemente vertical por meio da atividade da macrofauna e canais de radiculares, que geram essa condição, o que em termos agrícolas, cria melhores condições para a entrada de água no perfil do solo e disponibilidade de oxigênio na área da raiz (LOZANO et al., 2013). Enquanto nas áreas de mata nativa, a porosidade é caracterizada por cavidades interconectadas e inúmeros canais (LIMA et al., 2005), nas lavouras sob plantio direto a importância dessas cavidades aumenta em função da compactação, porque quando a resistência do solo é elevada as raízes seguem predominantemente esses caminhos (TORRES & SARAIVA, 1999). No estudo das propriedades físicas do solo, os poros oriundos da atividade biológica (bioporos) podem ser essenciais para a avaliação da condição estrutural do solo (LIMA et al., 2005).

É importante considerar a porosidade do solo no sistema plantio direto onde os valores de densidade do solo tendem a aumentar, com diminuição da macroporosidade e aumento da microporosidade (DA SILVEIRA et al., 2008). Além disso, deve ser levada em conta a distribuição de tamanho dos poros, porque a porosidade total do solo é constituída por macro e microporos, de forma que o aumento de um reduzirá a porcentagem do outro (WENDLING et al., 2012). Assim, para obter alta produção de soja é imprescindível que haja fluxo de água e ar no solo, para o qual tem que haver volume suficiente de macro e bioporos, além de uma configuração e continuidade de poros que permita o bom fluxo de água (HORN, 1990).

2.4 COMPACTAÇÃO DO SOLO

Segundo REICHERT et al., (2007), compactação é um aumento da massa ou redução do espaço poroso em determinado volume do solo, e que tem estreita relação com algumas propriedades físicas e mecânicas do solo, principalmente aquelas que apresentam maior relação massa/volume. Alguns ácidos orgânicos, produtos da decomposição de resíduos, podem gerar dispersão de argila e conseqüentemente aumentar a resistência à penetração do solo e obstruir poros que pode afetar a transferência de água no perfil do solo, como por exemplo, a ascensão de água por capilaridade (CORRÊA et al., 2008).

A falta de oxigênio, que ocorre quando os poros do solo estão ocupados por água, representa um limitante para o metabolismo das raízes, e uma provável causa de diminuição da produtividade. Ambas as situações estão condicionadas pela distribuição de tamanho de poros, que cumprem funções dependendo de seu tamanho e geometria. A distribuição de tamanho de poros varia de acordo ao uso e manejo do solo, assim, solos de mata nativa têm maior volume de espaços vazios, especialmente macroporos e bioporos, em relação às áreas de lavoura sob plantio direto, onde o tráfego contínuo de máquinas e implementos agrícolas aumenta a densidade do solo, que pode favorecer a ocorrência de microporos, alterando dessa maneira as faixas de umidade em que a água se encontra disponível às plantas, podendo gerar inconvenientes ao crescimento das raízes, devido à alta resistência mecânica do solo (RICHART et al., 2005). Quanto à localização desse efeito, ela pode ser maior nas camadas mais superficiais (até 10 cm) em relação às subsuperficiais (VALADÃO et al., 2015). Assim também, MICHELON et al. (2007), avaliando qualidade física do solo no estado de Rio Grande do Sul, reportaram que a maior parte das áreas de lavoura amostradas, apresentava indicativos de compactação na camada superficial do solo.

A compactação em níveis elevados pode comprometer a qualidade física do solo, podendo manifestar-se por meio da baixa infiltração e alta resistência à penetração das raízes, condições que podem reduzir a produtividade da soja nas áreas sob plantio direto (SUSUKI et al., 2007a). REICHERT et al. (2007) descrevem que este processo ocorre devido à aplicação de pressão mecânica sobre a superfície do solo acima da capacidade de suporte do solo, em uma condição de umidade do solo ideal onde a água atua como lubrificante permitindo o deslizamento das partículas, até atender um estado de menor volume, cuja intensidade dependerá da constituição do solo. No processo de diminuição de volume, aumenta a

superfície de contato entre os agregados e os poros estruturais, que se encontram entre os agregados, são comprimidos e convertidos em poros menores, o que impede o fluxo de água. Por outro lado, a água retida nos poros estruturais remanescentes deixa de contribuir para a disponibilidade para as plantas (RICHARD et al., 2001).

Segundo REICHERT et al. (2010) a resistência do solo à compressão é alcançada por dois diferentes mecanismos: por aumento no número total de pontos de contato entre partículas individuais, ou pelo aumento na resistência de cisalhamento por ponto de contato. Neste sentido, em solos de lavoura sob plantio direto onde podem ocorrer diversos tamanhos e graus de agregação, a resistência depende da estrutura do solo em termos de ângulos de atrito interno e coesão.

Em solos arenosos a água e os gases fluem livres pelos macroporos predominantes, essa alta permeabilidade diminui sua resistência frente à compactação. Por outro lado, em solos argilosos a compressibilidade é alta já que quando submetido a pressões podem deformar, porém, a baixa permeabilidade dificulta o escoamento de água transferindo assim a tensão ao líquido (MOLINA, 2017). O comportamento mecânico do solo pode ser influenciado pelo carbono orgânico, que aumenta a adsorção de água e modifica os índices de consistência do solo, aumentando a faixa de umidade em que ocorre a coesão entre as partículas de argila, e influencia o deslocamento ou deformação do solo (MOLINA, 2017; ADAMS et al., 2018).

Embora a compactação do solo seja prejudicial em níveis altos, o aumento dos poros menores pode permitir maior retenção de água, havendo volume suficiente de macroporos para a aeração (RICHARD et al., 2000; REICHERT et al., 2007), com benefícios à produção da soja (SUSUKI et al., 2007a; REINERT et al., 2008). Do ponto de vista nutricional, a compactação do solo pode gerar perdas de produtividade por reduzir a absorção de nutrientes principalmente àqueles que chegam até as raízes por fluxo de massa, que são afetados pela mudança na configuração dos poros (HORN, 1990). A produção da soja pode ser limitada pelo menor suprimento de nitrogênio por consequência da compactação do solo, que afeta a nodulação e a fixação biológica de nitrogênio (SICZEK & LIPIEC, 2011), além de perdas de nitrogênio por desnitrificação, devido à deficiência de drenagem e aeração (HOORMAN et al., 2011).

O aumento da densidade decorrente da compactação pode reduzir o desenvolvimento da soja diminuindo a macroporosidade e provocando modificações no fluxo de água e nutrientes do solo, além de afetar a atividade microbiana (DA SILVEIRA et al., 2008). A baixa percolação de água ocorre devido a mudanças da geometria e continuidade do sistema

de poros, causada pela diminuição de macroporos e destruição ou bloqueio de bioporos, com diminuição da condutividade hidráulica saturada e da permeabilidade ao ar (SORACCO et al., 2015).

A infiltração e redistribuição de água no solo ocorrem devido às diferenças de potencial de água no solo, mas para isso, é preciso que haja um contínuo de água entre as posições consideradas, que depende da continuidade de poros (LOZANO et al., 2014; LOZANO et al., 2016). Destaca-se a importância da conectividade dos poros para o fluxo de água no solo, especialmente os macroporos, que são os principais responsáveis por esse fluxo.

2.5 ESTRUTURA DO SOLO

A agregação do solo pode ser hierarquizada de acordo ao tamanho dos agregados em base a sua estabilidade em água, principalmente (SIX et al., 2004), o que pode ser relacionada com a conservação do solo e sustentabilidade na produção de culturas. A estabilização dos agregados pode ser relacionada com rearranjo, floculação e cimentação de partículas minerais do solo, mediados pelo carbono orgânico do solo, biota, ponte iônica, argila e carbonatos. As complexas interações desses agentes de agregação podem ser sinérgicas ou prejudiciais à agregação (BRONICK & LAL, 2005). A formação de agregados no solo, além de proteger fisicamente o carbono orgânico, influencia a biota do solo, difusão de oxigênio, fluxo de água e determina a adsorção e dessorção de nutrientes, processos que têm profundos efeitos na dinâmica da matéria orgânica do solo e no ciclo de nutrientes (SIX et al., 2004).

As melhores condições físicas do solo na camada superficial em sistema plantio direto podem ser ocasionadas pela maior agregação, devido ao maior teor de carbono orgânico (WENDLING et al., 2012; WINGEYER et al., 2015), que confere condições estruturais mais favoráveis as plantas. O acúmulo de carbono orgânico nesse sistema ocorre devido a menor perda anual de matéria orgânica comparado ao preparo convencional, sendo a taxa de perda dependente da textura, mineralogia do solo e das condições climáticas. Nesse sentido, a decomposição de resíduos na superfície do solo, pode gerar produtos e interferir nas propriedades físicas do solo, como ácidos orgânicos de baixo peso molecular, que geram dispersão de argila e aumentam a resistência à penetração do solo, dependendo da quantidade destes compostos, da textura e da mineralogia dos solos (CORRÊA et al., 2008). Por outro lado, o contínuo tráfego de máquinas pode levar à compactação na camada superficial, pelo

acúmulo de pressões (SUSUKI et al., 2007a; REINERT et al., 2008; WENDLING et al., 2012). Outros aspectos nesse sistema foram observados por ALBUQUERQUE et al. (2005), como os valores de dispersão de argila, que foram similares aos da mata nativa, assim como também houve correlação positiva entre o carbono orgânico e o diâmetro médio ponderado dos agregados, indicando que a ação da matéria orgânica ocorre principalmente em macroagregados.

Como já mencionado, na camada superficial de solos agrícolas sob sistema plantio direto predominam macroagregados (>250 μ m), que têm sido reportados como importantes para proteção de carbono neste sistema (WINGEYER et al., 2015). A estabilidade do carbono em macroagregados pode ser relacionada com o conteúdo de carbono orgânico particulado, podendo haver relação positiva entre macroagregados e atividade biológica na camada superficial do solo (CAMBERDELLA & ELLIOT, 1993; ALBUQUERQUE et al., 2005; WINGEYER et al., 2015). A transformação de resíduos orgânicos em macroagregados expressa por SIX et al. (2004) se deve à estabilização de macroagregados em torno ao carbono orgânico particulado, mediante exsudatos microbianos. Por outro lado, nos microagregados pode predominar carbono orgânico mais recalcitrante, e, à medida que o carbono orgânico lábil (particulado) decresce, o macroagregado perde estabilidade e eventualmente colapsa, liberando microagregados mais estáveis (BRONICK & LAL, 2005).

Em solos oxídicos como os Latossolos a agregação é mediada pelos óxidos de ferro por meio da interação química com os grupos funcionais da matéria orgânica, formando pequenos agregados com revestimento de argilas (VRDOLJAK & SPOSITO, 2002). KRAUSE et al. (2018) sugerem que a abundância de microagregados como unidade de construção é um requisito fundamental para a formação e estabilidade de agregados e que teores elevados de argila promovem a formação e estabilização de microagregados.

O fracionamento físico do carbono orgânico do solo, considerando a fração particulada e a associada aos minerais, é uma ferramenta indicada para relacionar atributos físicos e atividade biológica do solo (DUVAL et al., 2018). Nesse sentido, o cultivo de soja sob sistema de plantio direto, quando comparada às áreas de mata nativa, pode diminuir os teores de carbono orgânico, tanto do carbono orgânico total, quanto da fração particulada. Neste caso, pode atribuir-se a uma menor entrada de resíduos e condições mais favoráveis para a mineralização nas áreas de lavoura (DUVAL et al., 2016). DE OLIVEIRA et al. (2018), mencionam que em sistema de plantio direto consolidado, existe alta entrada e processamento de resíduos orgânicos em macroagregados, o que melhora a estrutura do solo e a infiltração de água, além de outras propriedades físicas. Por esses motivos, a fração de carbono orgânico

lável (particulado) tem sido indicada como apropriada para avaliar a qualidade do solo e diferenças entre manejo do solo (DUVAL et al., 2018), que pode ser válido para avaliar áreas de lavouras de soja sob plantio direto consolidado, devido ao acúmulo de carbono orgânico em diferentes classes de agregados (KRAUSE et al., 2018). Entretanto, CONTI et al. (2014), mencionam que solos sob contínuo cultivo de soja têm tendência preferencial a altas taxas de mineralização de formas lábeis de carbono orgânico e maior estabilidade biológica das formas humificadas.

3 HIPÓTESE

A produtividade da soja pode aumentar em função da melhoria nas propriedades físicas do solo, em comparação com a área de mata nativa, relacionadas ao aumento do carbono orgânico particulado em macroagregados.

4 OBJETIVOS

GERAL

Avaliar a relação dos atributos físicos e hídricos do solo com a produtividade de grãos de soja em áreas sob sistema plantio direto no Oeste Catarinense, comparativamente à mata nativa e sua relação com o carbono orgânico particulado de magroagregados.

ESPECÍFICOS

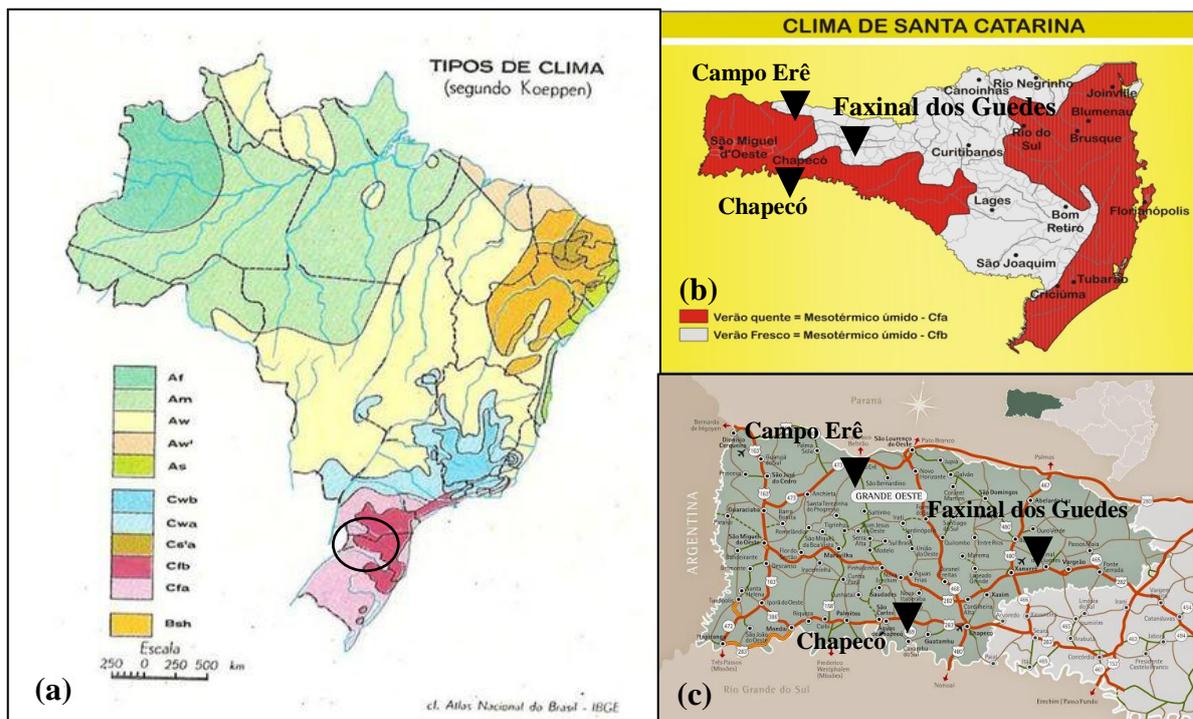
1. Avaliar a relação de propriedades físicas e hídricas do solo e frações de carbono orgânico do solo com a produtividade de grãos de soja.
2. Analisar a variação das propriedades físicas e hídricas do solo nas áreas de lavoura em relação a áreas de mata nativa.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 ÁREA DE ESTUDO

As áreas de estudo estão localizadas no Oeste do Estado de Santa Catarina nos municípios Campo Erê, Faxinal dos Guedes e Chapecó, abrangendo duas condições climáticas, que segundo classificação de Köppen incluem os tipos: mesotérmico úmido com verão quente em Chapecó, e mesotérmico úmido com verão fresco em Campo Erê e Faxinal dos Guedes (Figura 1).

Figura 1 – Localização das áreas de estudo. Tipo de clima e localização dentro do Brasil, (a) zona agroecológica, (b) região do estado e localização dos municípios.



Fonte: (a) FANDOM, 20_ disponível em: https://brasil.fandom.com/wiki/Clima_brasileiro; (b) GREGA, 2015, disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/3035280/> (c) PRANDI, 20_ disponível em: <https://mapasblog.blogspot.com/2011/10/mapas-de-santa-catarina.html>.

Em cada município foram selecionadas áreas de lavoura que vêm sendo manejadas sob sistema plantio direto por vários anos, e áreas de mata nativa, sem intervenção antrópica, como referencial de qualidade física do solo. Essas áreas, que representam as unidades experimentais, foram selecionadas em virtude do diferencial histórico de produtividade entre

elas, segundo o mencionado pelos produtores. Dados mais detalhados das áreas se apresentam no Quadro 1.

Quadro 1 – Histórico e caracterização das áreas de lavoura sob sistema plantio direto dos municípios da região Oeste de Santa Catarina: Campo Erê, Faxinal dos Guedes e Chapecó.

Área	Coordenada geográfica	Altitude	Adubação orgânica	Histórico de Manejo
Município Campo Erê				
Produtividade Alta	26°22'26.26"S-53°08'37.93"O	925 m	Não	Sistema plantio direto com 20 anos de implantação, com rotação de culturas milho (<i>Zea mays</i> L.), trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.), soja (<i>Glycine max</i> M.), aveia (<i>Avena strigosa</i> Schreb.), soja e nabo (<i>Raphanus sativus</i> L.) + aveia, soja e nabo nos últimos anos.
Produtividade Média	26°22'26.13"S 53° 8'44.48"O	920 m	Não	
Produtividade Baixa	26°22'6.62"S 53° 8'14.31"O	923 m	2 a 3 t ha ⁻¹ de cama de aves	Sistema plantio direto com 20 anos de implantação, com sucessão de culturas soja e aveia; soja e nabo nos últimos anos.
Município Faxinal dos Guedes				
Produtividade Alta	26°47'33.40"S 52°15'09.20"O	853 m	Não	Sistema plantio direto com 37 anos, com rotação de culturas nabo forrageiro + aveia preta + centeio (<i>Secale cereale</i> L.) + aveia branca (<i>Avena sativa</i> L.) + ervilha forrageira (<i>Pisum sativum</i> L.), soja, nabo forrageira + aveia preta + centeio, milho, soja e trigo
Produtividade Média	26°50'44.47"S 52°16'23.17"O	973 m	Não	Sistema plantio direto com 24 anos, com rotação de cultura soja, aveia, soja, trigo, soja e aveia + nabo + centeio + ervilha nos últimos 3 anos.
Produtividade Baixa	26°47'20.08"S 52°15'05.47"O	854 m	Não	Sistema plantio direto com 37 anos, com rotação de culturas nabo forrageiro + aveia preta + centeio + aveia branca + ervilha forrageira, soja, nabo forrageira + aveia preta + centeio, milho, soja e trigo
Município Chapecó				
Produtividade Alta	27°4'51.74"S 52°41'3.07"O	638 m	2 t ha ⁻¹ de cama de aves	Sistema plantio direto com 19 anos, com sucessão de culturas soja e azevém (<i>Lolium multiflorum</i>) nos últimos três anos
Produtividade Média	27°4'41.84"S 52°41'1.12"O	702 m		

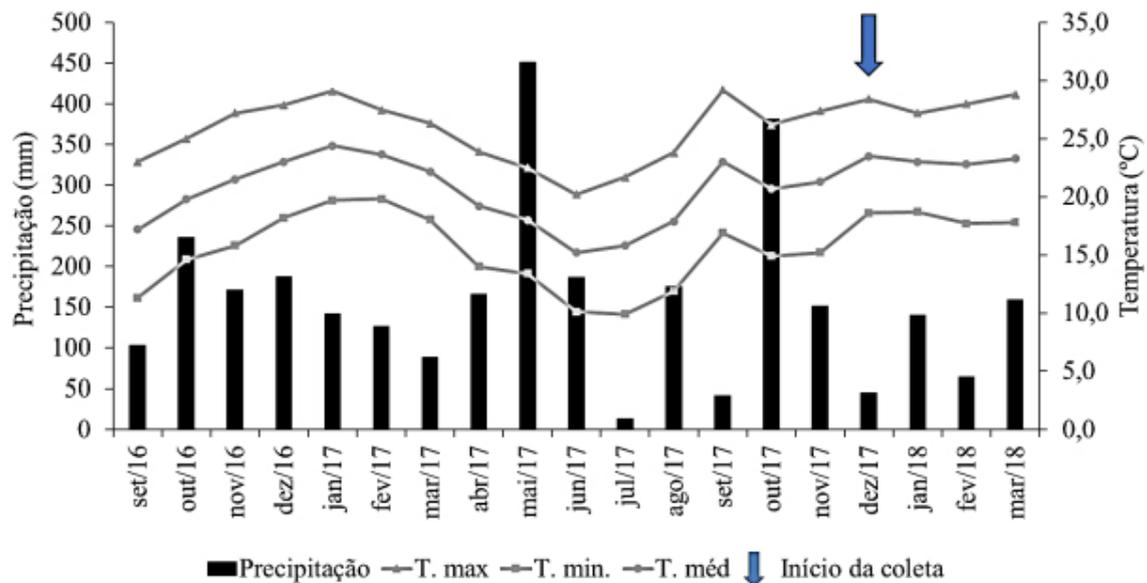
Fonte: elaborado por Elston Kraft, 2018.

Na microrregião com clima *Cfa*, representada pelo município Chapecó, foram selecionadas duas áreas lavoura e uma de mata nativa. Os municípios de Campo Erê e Faxinal dos Guedes, com três áreas de lavoura cada uma, representam a microrregião com clima *Cfb* e têm uma área (referência) de mata nativa.

Em cada município as áreas selecionadas se encontram próximas entre si, são cultivadas com o mesmo cultivar de soja e possuem tipos de solo e declividade similares.

Na Figura 2 são ilustrados dados climáticos que abrangem o período da safra em questão, entre os meses de outubro de 2018 e março de 2019.

Figura 2 – Dados de precipitação (mm), temperatura máxima, mínima e média (°C), com base nos dados da EPAGRI/CEPAF/CHAPECÓ e INMET.



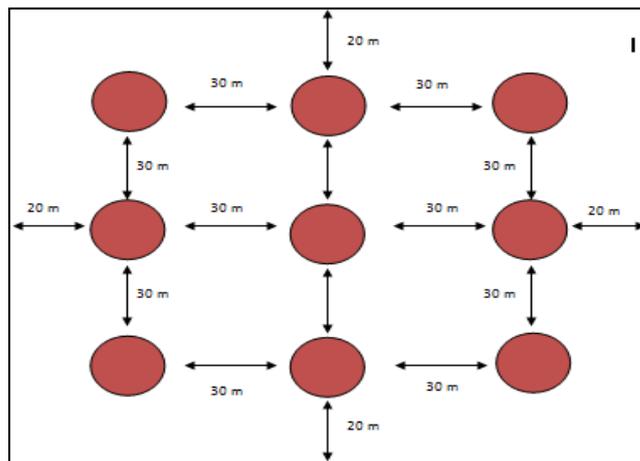
Fonte: elaborado por Elston Kraft, 2018.

5.2 AMOSTRAGEM E ANÁLISES

A coleta de amostras de solo foi realizada entre dezembro de 2017 e março de 2018 em nove pontos por cada área distribuídos segundo a ilustração na Figura 3. A amostragem foi feita na camada de 0 a 10 cm com pá de corte, e na camada de 0-5 e 5-10 cm com anéis tipo Kopeck de 6 cm de diâmetro e 5 cm de altura.

Como pode ser visto na Figura 3, incluindo as bordaduras, os 9 pontos de coleta abrangem 1 ha de superfície.

Figura 3 – Desenho representativo dos pontos de coleta das áreas de lavoura e mata nativa.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Para a determinação das variáveis: granulometria, teor de argila dispersa em água, estabilidade de agregados em água, fracionamento físico de matéria orgânica, carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (CAM), foram coletadas aproximadamente três quilogramas de amostras de solo, com pá de corte em forma de blocos de 20 cm de largura na camada de 0-10 cm. Para as determinações de porosidade (porosidade total (Pt), macroporos (Macro), microporos (Micro) e bioporos (Bio)), densidade do solo (Ds), condutividade hidráulica saturada (CH) e resistência do solo à penetração (RSP), a amostragem foi feita com anéis volumétricos em duas camadas: de 0-5 cm e 5-10 cm, respectivamente.

Para determinação granulométrica foi utilizado o método da pipeta tal como mencionado em GEE & BAUDER (1986), utilizando NaOH para dispersão na determinação de argila total. A determinação de argila dispersa em água ocorreu conforme o procedimento descrito para argila total, mas sem a adição de NaOH.

A estabilidade de agregados em água foi determinada pelo método de peneiramento úmido padrão (KEMPER & CHEPIL, 1965), com amostras de solo destorroadas e peneirados entre 4,76 mm a 8 mm de diâmetro, da qual foram pesadas três amostras de 25 g cada, sendo uma destinada para determinação de umidade, e duas como repetições por amostra. A agitação foi efetuada em aparelho de oscilação vertical sobre um conjunto de peneiras de 4,76 mm, 2 mm, 1 mm e 0,250 mm de diâmetro, submersas em água por 10 minutos e submetidas

a oscilação vertical por 10 minutos, com 30 oscilações por minuto. O material retido em cada peneira foi retirado com auxílio de jatos de água e colocado em latas de alumínio pré-pesadas, para secagem em estufa a 105°C por 24 horas. Os agregados foram classificados por classes de diâmetro: Classe 1 com diâmetro médio de 6,38 mm; Classe 2 com diâmetro médio de 3,38 mm; Classe 3 com diâmetro médio de 1,50 mm; Classe 4 com diâmetro médio de 0,625 mm; classe 5 com diâmetro médio de 0,125 mm.

O fracionamento físico granulométrico de carbono foi realizado em amostras de solo da camada 0-10 cm, coletadas com pá de corte, e em macroagregados das classes 1 e 2, juntos (macroagregados de 2 a 8 mm diâmetro), provenientes da análise de estabilidade de agregados em água. Antes de proceder ao fracionamento, as amostras foram passadas por peneira de 2 mm, utilizando 20 g de terra, colocada em copos snap-caps, com 60 ml de hexametáfosfato de sódio para posterior agitação horizontal por 15 horas. O fracionamento foi realizado em peneira de 53 µm, onde o material ultrapassado representa a fração associada aos minerais, e o retido a fração particulada, que é retirada com auxílio de jatos de água, depositada em latas de alumínio pré-pesadas e levada a estufa de 60°C por 24 horas. Uma vez seca essa fração particulada foi moída em gral de porcelana para determinação do carbono orgânico da fração particulada em analisador elementar por combustão seca. O carbono orgânico total foi determinado por meio do mesmo procedimento descrito para COP, com a diferença de ser feita em amostra não submetida ao fracionamento. A fração associada aos minerais foi obtida por diferença entre o carbono orgânico total e a fração particulada.

O cálculo para estoque de carbono orgânico do solo, teor de carbono da fração particulada, teor de carbono da fração associada aos minerais na camada 0-10 cm, foi realizado segundo mencionam FERNANDES & FERNANDES (2013).

$$\text{COS} = (\text{CO ou COP ou CAM} \times \text{Ds} \times \text{e}) / 10$$

Onde:

CO = teor de carbono orgânico total (g kg⁻¹)

COP= teor de C orgânico da fração particulada (g kg⁻¹)

CAM= teor de carbono orgânico da fração associada aos minerais (g kg⁻¹)

Ds = densidade do solo da camada 0-10 cm (kg dm⁻³)

e = espessura da camada (cm)

A avaliação do estoque de carbono orgânico particulado dos macroagregados (COP_{mac}), estoque de carbono orgânico dos macroagregados ($C-COP_{mac}$), estoque de carbono orgânico associado aos minerais dos macroagregados (CAM_{mac}) e os teores em massa de carbono orgânico particulado ($MassCOP$), carbono orgânico dos macroagregados ($MassC_{mac}$), carbono orgânico associado aos minerais ($MassCAM_{mac}$), foi calculada seguindo os procedimentos mencionados em DE OLIVEIRA et al. (2018).

Massa de COP, COT e CAM em macroagregados ($Mg\ ha^{-1}$) das classes 1 e 2 (2-8 mm):

$$MasCOP_{mac}\ ou\ MasCOT\ ou\ MasCAM_{mac} = Massa\ do\ solo\ (Mg\ ha^{-1}) \times \% \ CO\ ou\ \% \ COP\ ou\ \% \ CAM\ (da\ classe\ 2-8\ mm) / 100$$

Estoque de carbono da fração particulada, total de macroagregados e da fração associada aos minerais em macroagregados ($Mg\ ha^{-1}$) das classes 1 e 2 (2-8 mm):

$$COP_{mac}\ ou\ Comac\ ou\ CAM_{mac} = estoque\ de\ CO\ ou\ COP\ ou\ CAM\ do\ solo\ (Mg\ ha^{-1}) \times CO\ ou\ COP\ ou\ CAM\ (\%) / 100$$

Onde:

$$Massa\ do\ solo\ (0-10\ cm) = Ds\ (Mg\ ha^{-1}) \times 1000$$

% COT = percentagem de carbono orgânico total dos macroagregados

% COP = percentagem de carbono orgânico total da fração particulada dos macroagregados

% CAM = percentagem de carbono orgânico total da fração associada aos minerais dos macroagregados

Os anéis coletados a campo foram submetidos à saturação em bandejas para serem colocados em mesa de tensão e submetidos a 10 kPa, 60 kPa e 100 kPa de tensão, para determinar: microporosidade (micro) $m^3\ m^{-3} = [(mS60cm - mSS)/V]$; bioporosidade (bio) $m^3\ m^{-3} = [(mSSat - mS10cm)/V]$; macroporosidade (macro) $m^3\ m^{-3} = PT - micro$. Sendo V o volume do anel, PT porosidade total obtida por diferença entre massa de solo saturado (mSSat) e massa de solo seco (mSS), mS60-massa do solo a 60 kPa de sucção e mSS a massa do solo seco em estufa a 105 C. A densidade do solo (Ds) foi obtida dividindo a massa de solo seco e o volume do anel, em base ao qual calculou-se a porosidade total (PT) por meio da formula, $PT\ m^3\ m^{-3} = [(mSSat - mSS) / V]$. Estas determinações foram feitas seguindo o descrito em EMBRAPA (1997).

A condutividade hidráulica saturada foi determinada em laboratório com aparelho de carga variável e a partir de amostras de solo em anéis volumétricos de $141,3\ cm^3$, calculando-

se a mesma, com base a massa de água movimentada verticalmente no anel volumétrico, com uso do programa Ksat 2008.

Para avaliação da resistência à penetração do solo contido em anéis volumétricos, a umidade foi padronizada em mesa de tensão com tensão de 100 kPa, e em seguida foram medidas as resistências por meio do penetrômetro de bancada marca Marconi, provido de cone de 3 mm de diâmetro e velocidade de penetração de 30 mm/minuto. Os resultados de cada amostra representam a média aritmética dos valores obtidos em cada leitura.

Para determinação do rendimento da soja nas áreas de lavoura, foram coletadas plantas de soja em etapa de maturidade fisiológica de 1 m² de superfície em cada ponto onde foram coletadas as amostras de solo (Figura 3), para determinar o rendimento de grãos. Os grãos trilhados foram colocados em recipientes e levados à estufa para secagem a 65 °C até atingir massa constante, e uma vez pesado, os resultados obtidos foram calculados em kilogramas por hectare.

5.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para determinar o grau de relacionamento das variáveis do solo avaliadas com a produtividade em grãos da soja, realizou-se uma análise de correlação linear múltipla *stepwise* com o programa estatístico SAS[®], com os rendimentos da soja como variável dependente e as variáveis do solo avaliadas como variáveis independentes. No processo, foi avaliada a normalidade dos dados por meio do teste Shapiro-Wilk.

Para avaliar a variação de qualidade física do solo das áreas de lavoura em comparação com as áreas de mata nativa, realizou-se análise de componentes principais (ACP) com uso do programa PAST 3.19, e utilizando apenas as variáveis físicas do solo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE SOJA

Os rendimentos de soja foram semelhantes ($p < 0,05$) nos municípios Chapecó e Campo Erê, havendo diferença significativa somente em Faxinal dos Guedes (Tabela 2). Neste caso, a diferença observada foi semelhante à encontrada por ADAMS et al. (2018), avaliando gradientes de produtividade entre áreas de alta (5498 kg/ha) e média (4701 kg/ha) produtividade em dois anos consecutivos, em que a variação de rendimento foi em torno a 700 kg por hectare.

Em todas as áreas, as produtividades de grãos de soja superaram a média estadual estimada em 3.583 kg/ha para a safra 2017/2018 (ALVES & ELIAS, 2017), sendo então considerados altos rendimentos. No referente à magnitude dos rendimentos, foram superiores aos observados em outros estudos realizados na região sul do Brasil (AMADO et al., 2007; SUSUKI et al., 2007a; DE OLIVEIRA et al., 2018).

Tabela 1 – Médias de produtividade de grãos de soja (kg ha^{-1}) das áreas na safra 2017/2018.

Município	Produtividade prevista		
	Alta	Média	Baixa
		---- kg ha^{-1} ----	
Campo Erê	5569 ns	5337 ns	5758 ns
Faxinal dos Guedes	5179 a	4428 ab	4079 b
Chapecó	5114 ns	4674 ns	
CV %	16,24	14,77	22,51

Médias seguidas de letras distintas na fila diferem pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). ns: não significativo. CV: coeficiente de variação.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

De acordo com os rendimentos em grãos de soja obtidos, considera-se que a distribuição de chuvas durante a safra em questão foi adequada (Figura 2), destacando-se que as temperaturas tenham sido inferiores a 30 °C, diminuindo a evapotranspiração da cultura.

Todas as áreas apresentaram altos coeficientes de variação, com valores de 16 % a 22 %, que também foi reportado por AMADO et al. (2007), que avaliaram rendimentos de soja de três safras e observaram em duas safras coeficientes de variação acima do 15%.

6.2 PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE SOJA E PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

A análise de correlação linear múltipla *stepwise* explicou 39,5% da produtividade da soja em Campo Erê e 30,8% em Faxinal dos Guedes, enquanto que em Chapecó não houve variáveis relacionadas com a produtividade da soja. STONE et al. (2013) aplicando correlação linear múltipla para avaliar o efeito dos atributos do solo sobre a produtividade de feijoeiro, reportaram que a produtividade do feijoeiro foi explicada em 49% por um conjunto de atributos do solo, considerada pelos autores como altamente satisfatório tendo em conta que a produtividade depende da interação de fatores climáticos, da planta e do solo. As variáveis explicativas explicaram apenas parte da produtividade, mas deve-se considerar a camada avaliada e a profundidade explorada pela soja.

Em Campo Erê as variáveis identificadas na análise foram condutividade hidráulica saturada da camada 5-10 cm e microporos da camada 5-10 cm, com R^2 individual de 27,6% e 11,8%, respectivamente.

$$\text{Produtividade} = 9460 - 5,82_{CH(5-10\text{ cm})} - 7417,6_{\text{Micro}(5-10\text{ cm})}$$

Essas variáveis estão diretamente relacionadas ao fluxo e retenção de água no solo. Ainda que o volume de microporos não tenha apresentado diferença mínima significativa ($p < 0,05$) entre as duas camadas avaliadas (Tabela 2), a densidade do solo, porosidade total, macroporos, bioporos e resistência do solo à penetração, que apresentaram diferença entre as duas camadas avaliadas, indicam condições de compactação na camada 5-10 cm e da camada subjacente, já que em sistema plantio direto este fenômeno ocorre comumente na camada de 5-15 cm, devido ao acúmulo de pressões e não revolvimento do solo (MICHELON et al., 2007; SUSUKI et al., 2007a). CARDOSO et al. (2006) reportaram que nessa condição, ocorre maior concentração radicular da soja na camada 0-5 cm, diminuindo gradativamente até 20 cm de profundidade, situação que segundo os autores, não afetou a produtividade de grãos de soja. Da mesma forma, DE LIMA et al. (2013) reportaram aumentos da resistência do solo à penetração a partir de 10 cm de profundidade em solos com distribuição granulométrica similar à do presente estudo.

A diminuição da produtividade de grãos de soja com aumentos da condutividade hidráulica saturada e volume de macroporos na camada de 5-10 cm segundo mostrado na equação, provavelmente seja relacionada com a deficiência na captação e armazenamento de água no solo, que podem causar o aumento dessas variáveis. A condutividade hidráulica em solo saturado depende do tamanho e configuração dos poros do solo de tal modo que a água

flui preferencialmente nos poros maiores (HILLEL, 1998). A diminuição do volume de macroporos e bioporos na camada de 5-10 cm (Tabela 2) pode ter afetado a redistribuição de água no solo. A inclusão de plantas de cobertura é importante para a criação de poros biológicos de alta funcionalidade que contribuem, fundamentalmente, no fluxo de água e ar no perfil do solo, contudo, os efeitos sobre o solo variam para cada espécie (REINERT et al., 2008; DA SILVEIRA et al., 2008). Assim, as raízes do nabo, semeado em rotação nos últimos anos (Quadro1), podem ter criado de poros com tendência vertical, aumentando a infiltração de água no solo. Por sua vez, CARDOSO et al. (2006) relataram que em lavouras sob sistema plantio direto as fissuras, que também contribuem com a infiltração de água no solo, foram mais desenvolvidas em solos compactados, principalmente nos primeiros 15 cm de profundidade. Em suma, considerando os valores de porosidade (Pt, Macro, Bio), densidade do solo e resistência do solo à penetração na camada 5-10 cm (Tabela 2), sugere-se dificuldade ao crescimento radicular da soja.

Apesar do efeito negativo dessas variáveis (CH_{5-10cm} e $Micro_{5-10cm}$) como visto na equação 4, a produtividade de grãos de soja observada indica que esse efeito, e os indícios de compactação vistos nessa camada (Tabela 2), não foram pronunciados. Os valores de densidade do solo observados não atingiram níveis críticos, que para esse tipo de solo, com teores de argila entre 200 e 550 g kg⁻¹, é de 1,55 Mg m⁻³ (MICHELON et al., 2009). Da mesma forma, vários autores reportaram valores de resistência do solo à penetração similar às encontradas neste estudo, sem afetar a produtividade de grãos de soja (BEUTLER & CENTURION, 2003; RICHART et al., 2005; REICHERT et al., 2007; SUSUKI et al., 2007a). Destaca-se que esse resultado pode ser devido à ausência de restrição hídrica, devido à adequada distribuição de chuvas durante a safra (CARDOSO et al., 2006; REICHERT et al., 2007). Incrementos no teor de carbono orgânico do solo podem diminuir os efeitos da compactação (RICHART et al., 2005), fato que pode ter ocorrido nestas áreas, levando em conta o tempo de adoção do sistema plantio direto (Quadro 1) e os estoques de carbono orgânico do solo observados (Tabela 2).

Tabela 2 – Média das variáveis avaliadas na camada 0-10 cm: argila dispersa em água (ADA), densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporos (Macro), bioporos (Bio), microporos (Micro), resistência do solo à penetração (RSP), condutividade hidráulica saturada (CH), agregados de classe 1 (Class1), agregados de classe 2 (Class2), agregados de classe 3 (Class3), agregados de classe 4 (Class4), agregados de Classe 5 (Clase5), carbono orgânico do solo (COS) nas áreas de Produtividade Alta (PA), Produtividade Média (PM), Produtividade Baixa e mata nativa (MN).

Município	Áreas	Areia	Silte	Argila	ADA	Ds (0-5 cm)	Ds (5-10 cm)	Pt (0-5 cm)	Pt (5-10 cm)
			g kg ⁻¹		%		g cm ⁻³		m ³ m ⁻³
Campo Erê	PA	311 c	371 a	318 b	10 b	1,01 A ns	1,09 A ns	0,64 B ns	0,61 B ns
	PM	218 d	352 a	430 a	23 a	1,00 A b	1,16 A a	0,63 B a	0,60 B b
	PB	377 b	339 a	284 bc	13 b	0,98 A b	1,07 A a	0,66 B a	0,61 B b
	MN	456 a	306 b	238 c	20 a	0,65 B ns	0,69 B ns	0,73 A ns	0,70 A ns
Faxinal dos Guedes	PA	273 b	274 b	453 a	19 ns	0,96 Ab	1,12 Aa	0,61 Ba	0,54 Bb
	PM	245 b	330 a	425 a	22 ns	0,97 Ab	1,14Aa	0,61 Ba	0,55 Bb
	PB	244 b	304 ab	452 a	22 ns	0,98 Ab	1,15 Aa	0,60 Ba	0,56 Bb
	MN	456 a	306 ab	238 b	20 ns	0,65 B ns	0,69 B ns	0,73 A ns	0,70 ns
Chapecó	PA	144 b	353 ns	503 a	3 c	1,38 Ab	1,49 Aa	0,56 B a	0,52 C b
	PM	266 a	374 ns	360 b	15 b	1,31 A ns	1,40 A ns	0,57 B ns	0,56 B ns
	MN	278 a	363 ns	359 b	19 a	0,84 Bb	0,98 Ba	0,65 A ns	0,68 A ns

Município	Áreas	Macro (0-5 cm)	Macro (5-10 cm)	Bio (0-5 cm)	Bio (5-10 cm)	Micro (0-5 cm)	Micro (5-10 cm)	RSP (0-5 cm)	RSP (5-10 cm)
		m ³ m ⁻³		m ³ m ⁻³		m ³ m ⁻³		MPa	
Campo Erê	PA	0,14 B a	0,09 B b	0,06 C a	0,04 B b	0,50 AB ns	0,52 A ns	1,8 ns b	2,6 ns a
	PM	0,17 B a	0,10 B b	0,10 B a	0,05 B b	0,46 B ns	0,47 B ns	1,6 ns b	2,3 ns a
	PB	0,15 B a	0,10 B b	0,06 BC a	0,04 B b	0,50 A ns	0,47 B ns	1,7 ns b	2,5 ns a
	MN	0,26 A ns	0,21 A ns	0,15 A ns	0,12 A ns	0,47 AB ns	0,49 AB ns	1,3 ns	2,5 ns
Faxinal dos Guedes	PA	0,14 Ba	0,07 Bb	0,05 Ba	0,03 Bb	0,47 ns	0,46 B ns	2,0 ns b	4,2 ns a
	PM	0,16 Ba	0,06 Bb	0,08 Ba	0,03 Bb	0,44 ns b	0,49 Aa	1,7 ns b	4,0 ns a
	PB	0,14 Ba	0,08 Bb	0,05 B ns	0,03 B ns	0,47 ns	0,47 AB ns	1,9 ns b	4,5 ns a
	MN	0,26 A ns	0,21 A ns	0,15 A ns	0,12 A ns	0,47 ns	0,49 A ns	1,3 ns	2,5 ns
Chapecó	PA	0,12 Ba	0,08 Bb	0,07 B ns	0,04 B ns	0,44 ns	0,44 ns	4,1 ns	6,3 A ns
	PM	0,13 B ns	0,11 B ns	0,07 B ns	0,06 B ns	0,44 ns	0,45 ns	3,1 ns	4,6 A ns
	MN	0,22 A ns	0,23 A ns	0,14 A ns	0,15 A ns	0,43 ns	0,44 ns	2,2 ns	2,2 B ns

Município	Áreas	CH (0-5 cm)	CH (5-10 cm)	Clas1	Clas2	Clas3	Clas4	Clas5	COS
		mm h ⁻¹				%			Mg ha ⁻¹
Campo Erê	PA	78 ns	27,3 B ns	88,24 a	8,87 b	0,65 b	1,38 b	0,83 b	89,63 a
	PM	276 ns	77 B ns	83,55 a	13,49 ab	0,93 b	1,34 b	0,66 b	72,1 b
	PB	183 ns	45 B ns	73,25 b	19,05 a	3,01 a	4,05 a	0,63 b	76,54 b
	MN	320 ns	294 A ns	80,30 ab	13,82 ab	0,97 b	2,60 ab	2,38 a	67,91 b
Faxinal dos Guedes	PA			90,52 a	7,23 b	0,69 ns	0,77 b	0,76 b	54,90 c
	PM			91,32 a	6,12 b	0,19 ns	0,42 b	1,93 b	80,72 a
	PB			93,46 a	4,86 b	0,31 ns	0,67 b	0,67 b	63,67 b
	MN			80,30 b	13,82 a	0,89 ns	2,60 a	2,38 a	67,91 b
Chapecó	PA	380 ns	341 ns	90,08 ns	7,93 ns	0,37 ns	0,55 b	1,05 ns	37,68 c
	PM	218 ns	95,3 ns	88,15 ns	10,45 ns	0,30 ns	0,81 a	0,26 ns	48,09 b
	MN	708 ns	298 ns	89,25 ns	9,77 ns	0,13 ns	0,18 c	0,65 ns	61,74 a

Médias seguidas por letras maiúsculas distintas na coluna diferem entre si pelo Teste Tukey (p<0,05). Médias seguidas por letras minúsculas distintas, na linha entre duas mesmas variáveis, diferem entre si pelo Teste Tukey (p<0,05). ns: não significativo (p<0,05).

Fonte: elaborado pelo autor, 2018.

Em Faxinal dos Guedes as variáveis, massa de carbono orgânico associado aos minerais de macroagregados (MasCAMmac) e estoque de carbono orgânico associado aos minerais de macroagregados (CAMmac), foram as que melhor explicaram a produtividade em grãos da soja, com participação de 18,14 % e 12,69 %, respectivamente.

$$\text{Produtividade} = 2007,8 + 84,11_{\text{MasCAMmac}} - 942,33_{\text{CAMmac}}$$

Nesta equação pode-se observar que MasCAMmac possui sinal positivo e CAMmac sinal negativo. O comportamento oposto dessas variáveis em relação à produtividade de grãos da soja pode estar relacionado à acumulação do carbono orgânico do solo em sistema plantio direto. Por uma parte, a acumulação de carbono orgânico associado aos minerais em macroagregados, com sinal positivo, pode indicar acúmulo de carbono orgânico no solo em formas mais estáveis (LIMA et al., 2016; DE MORAES DE SÁ et al., 2018). Por outro lado, o processo de acumulação de carbono orgânico no solo começa com aumento do carbono orgânico particulado (DE MORAES DE SÁ et al., 2018), onde os macroagregados têm participação na proteção física dessa fração, assim, o aumento do aporte de resíduos leva a maior estoque de carbono orgânico particulado em macroagregados e maior redistribuição para as frações mais estáveis, gerando acumulação de carbono orgânico nos macroagregados (BRIEDIS et al., 2018; DE OLIVEIRA et al., 2018). Sendo a fração de carbono orgânico particulado altamente relacionada com atributos físicos do solo (DUVAL et al., 2013; LIMA et al., 2016; DUVAL et al., 2018), tem-se um indicativo do fluxo de carbono em macroagregados (DE OLIVEIRA et al., 2018). Por outro lado, o maior estoque da fração associada aos minerais em macroagregados provavelmente indique maior proporção desta última, e portanto menor fluxo de carbono, o que pode explicar o sinal negativo do CAMmac na equação 1 em relação à produtividade de grãos de soja.

Em Chapecó não houve variáveis explicativas para a produtividade de grãos de soja. Neste caso, a profundidade amostrada e a avaliação da produtividade de grãos de soja feita somente em uma safra, podem ter limitado à hora de relacionar os atributos avaliados com a produtividade em grãos da soja e explicar as percentagens de explicação obtidas.

Tabela 3 – Média das frações granulométricas de carbono da camada 0-10 cm: massa de carbono orgânico particulado de macroagregados (MasCOPmac), massa de carbono orgânico total de macroagregados (MasCOTmac), massa de carbono orgânico associado aos minerais de macroagregados (MasCAMmac), carbono orgânico particulado de macroagregados (COPmac), carbono orgânico de macroagregados (COMac), carbono orgânico associado aos minerais de macroagregados (CAMmac), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (CAM) nas áreas de Produtividade Alta (PA), Produtividade Média (PM), Produtividade Baixa e mata nativa (MN).

Município	Áreas	MasCOPmac	MasCOTmac	MasCAMmac	COPmac	COMac	CAMmac	COP	CAM
		Mg ha ⁻¹							
Campo Erê	PA	33,19 a	93,2 a	60,01 a	1,27 a	7,95 a	2,88 ns	38,85 a	50,78 a
	PM	16,11 b	74,53 b	58,42 a	0,35 b	4,96 b	2,68 ns	21,97 b	50,13 a
	PB	21,86 b	81,02 b	59,16 a	0,65 b	6,03 b	2,65 ns	30,33 ab	46,21 ab
	MN	15,34 b	59,25 c	43,91 b	0,60 b	5,84 b	2,58 ns	25,58 b	40,54 b
Faxinal dos Guedes	PA	10,22 b	66,82 b	56,59 a	0,19 b	3,50 b	1,94 b	18,89 b	36,01 b
	PM	16,24 a	78,11 a	61,87 a	0,53 a	5,95 a	2,73 a	33,58 a	47,15 a
	PB	14,26 ab	62,20 b	47,94 b	0,30 b	3,80 b	2,05 b	18,20 b	45,47 a
	MN	15,34 a	59,25 b	43,91 b	0,60 a	5,84 a	2,58 a	25,58 b	40,54 ab
Chapecó	PA	8,90 a	42,98 b	34,08 b	0,06 b	1,13 b	0,69 c	8,54 b	29,14 b
	PM	6,24 b	39,12 b	32,88 b	0,04 b	1,36 b	0,94 b	8,14 b	39,95 a
	MN	7,50 ab	52,75 a	45,25 a	0,16 a	3,55 a	2,11 a	18,74 a	43,00 a

Médias seguidas por letras maiúsculas distintas na coluna diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$). ns: não significativo ($p < 0,05$).

Fonte: elaborado pelo autor, 2018.

6.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO EM ÁREAS DE LAVOURA E MATA NATIVA

Em todos os municípios, a ACP teve no componente 1 aproximadamente metade da variabilidade total dos dados, e junto ao componente 2, representaram em torno ao 60 % a variação total dos dados. As cargas (*loadings*) de correlação do ACP indicam efeito do manejo nas áreas de lavoura sobre as propriedades físicas do solo, tal como pode ser observado nos gráficos de correlações (Apêndices A, C e F), onde as variáveis são separadas em dois grupos contrapostos. Por um lado, a densidade do solo, resistência do solo à penetração, frações silte e argila e agregados de classe 1, tiveram os valores de correlação mais altos e representaram um grupo, contrastando com as variáveis, macroporos, bioporos e fração areia (Apêndices A, D e F). Essas variáveis estiveram associadas ao componente 1 do ACP e foram as mais efetivas para descrever o conjunto de dados nos três municípios.

Houve diferenças ($p < 0,05$) para granulometria do solo entre as áreas de todos os municípios (Tabela 2), refletindo a variabilidade espacial deste atributo nas áreas avaliadas. Com exceção de Faxinal dos Guedes, onde não houve diferença significativa, os valores de argila dispersa em água variaram entre as áreas nos municípios Chapecó e Campo Erê (Tabela 2).

A dispersão de argila pode ser ocasionada pela produção de ácidos orgânicos ou por aumento da dupla camada difusa causada pelo aumento dos valores de pH em solos com carga variável (ALBUQUERQUE et al., 2005; CÔRREA et al., 2008). Nos gráficos gerados pela ACP observou-se contraste entre as áreas de lavoura e mata nativa (Figuras 4, 5 e 6) sendo essa variável mais relacionada com as áreas de mata nativa, o que pode ser devido ao menor teor de argila dessas áreas, onde a ação dos ácidos orgânicos pode ser maior. Os solos oxidícos possuem maior quantidade de sítios de absorção, em decorrência dos altos teores de óxido de Fe e Al, e parte desses sítios encontram-se no interior de microagregados de alta estabilidade e de difícil acesso para a ação local dos ácidos (CORREA et al., 2008), razão pela qual maiores teores de argila nas áreas de lavoura podem ter contribuído com menor expressão de argila dispersa em água.

Quanto às frações granulométricas, além das áreas de lavoura em comparação com a mata nativa, houve variação entre áreas em todos os municípios. Nos casos mais extremos essa variação foi em torno de 200 gramas, o que porém, pode ter pouco efeito prático, visto serem solos argilosos. As áreas de mata nativa tiveram maiores teores de areia que as áreas de

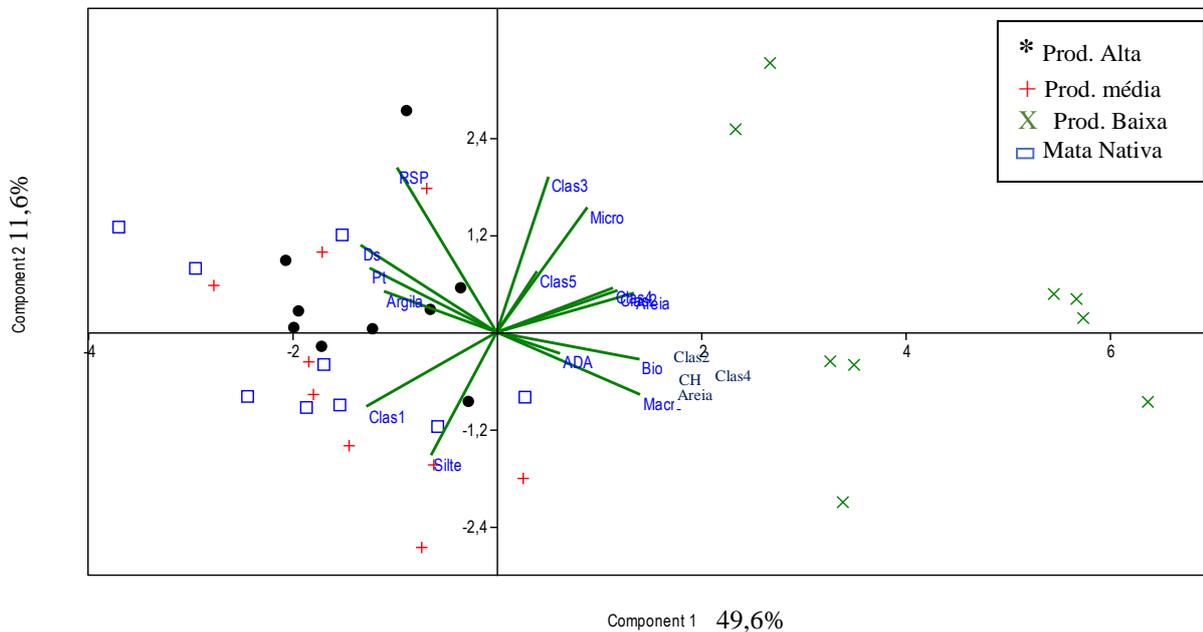
lavoura nos três municípios (Tabela 2), condição que pode contribuir para maior expressão de poros de drenagem nessas áreas (LOZANO et al., 2013; ADAMS et al., 2018). Em Chapecó, a área de produtividade média em relação à área de produtividade alta, se encontra mais próxima da área de mata nativa e não apresenta diferença ($p < 0,05$) em conteúdo de areia (Tabela 2). Da mesma forma, a área de produtividade baixa de Campo Erê, teve maiores teores de areia que as demais áreas de lavoura desse município (Tabela 2) e sua posição no sentido do componente 1 em comparação com a área de mata nativa (Figura 5) refletiu menor contraste.

A densidade do solo foi influenciada pelo manejo dada a associação dessa variável com as áreas de lavoura no ACP (Figura 4,5,6) e a posição oposta da área de mata em referência a essa variável. Os teores de argila em Faxinal dos Guedes e Chapecó, e da fração silte em caso de Campo Erê, influenciaram a expressão da densidade do solo. **A matéria orgânica melhora a estrutura do solo e diminui a densidade do solo (DA SILVEIRA et al., 2008; DUVAL et al., 2015)**, sendo seu efeito mais intenso em solos de mata nativa, pelo contínuo aporte de resíduos, alta atividade biológica e não revolvimento do solo, enquanto que nas áreas de lavoura, submetidas ao tráfego de máquinas, a composição granulométrica do solo teve maior relevância. **DE LIMA et al. (2013) mencionam que solos com ampla distribuição de tamanho de partículas podem ter os espaços entre os poros maiores preenchidos por partículas menores, viabilizando a formação de camadas compactadas quando submetidos a pressões externas.** Isso pode explicar a correlação entre as frações silte e argila com a densidade do solo e resistência do solo à penetração. Porém, a argila pode ter apresentado maior relevância devido a que solos com predomínio desta fração possuem maior susceptibilidade à compactação, quando são aplicadas pressões sobre a superfície do solo em faixas de umidade inadequadas (REICHERT et al., 2007).

A resistência do solo à penetração nos gráficos de ACP (Figuras 4, 5 e 6) teve relação similar à densidade do solo, em posição oposta à área de mata nativa. Diversos autores relatam essa relação de aumento da resistência à penetração do solo com a densidade do solo, que a partir de um ponto crítico, pode afetar o intervalo hídrico ótimo (REICHERT et al., 2007; SUSUKI et al., 2007b; MICHELON et al., 2009). Por outra parte, aumentos da resistência à penetração do solo podem beneficiar a cultura da soja, pelo maior contato solo/raiz, que favorece a absorção de água e nutrientes por unidade de raiz (BEUTLER & CENTURION, 2003). Alguns autores sinalam que valores de resistência à penetração acima do nível crítico, como encontrado neste estudo (Tabela 2), podem não afetar o desenvolvimento das culturas, seja pelo crescimento preferencial das raízes em macroporos e

bioporos, ou pela suficiência de chuvas durante o ciclo da cultura (RICHART et al., 2005; CARDOSO et al., 2006).

Figura 4 – Análise de componentes principais (ACP) a partir das variáveis do solo, nas áreas de lavoura e mata nativa do município Faxinal dos Guedes. Densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporos (Macro), bioporos (Bio), microporos (Micro), agregados de classe 1 (Clas1), agregados de classe 2 (Clas2), agregados de classe 3 (Clas3), agregados de classe 4 (Clas4), agregados de classe 5 (Clas5), resistência do solo à penetração (RSP), areia (Ar), silte (Sil), argila (Arg), argila dispersa em água (ADA).



Fonte: elaborado pelo autor, 2018.

Mesmo que em Chapecó uma das áreas de lavoura não tenha apresentado diferença significativa ($p < 0,05$) no teor de areia em relação à área de mata nativa, os volumes de macroporos e bioporos foram inferiores em relação à mata, como ocorreu também nos outros municípios (Tabela 2). Isso pode ser reflexo da natureza do solo da mata, com alto aporte de resíduos orgânicos e alta atividade biológica, característica que favorece a criação desses poros (LIMA et al., 2005; SILVA et al., 2006; WENDLING et al., 2012). A associação dessas variáveis com as áreas de mata nativa torna-se mais evidente no gráfico de ACP (Figura 4,5,6) onde essa área se separa das áreas de lavoura, situando-se em posição contrária às mesmas. No entanto em Chapecó, a área de produtividade média tem maior aproximação à área de

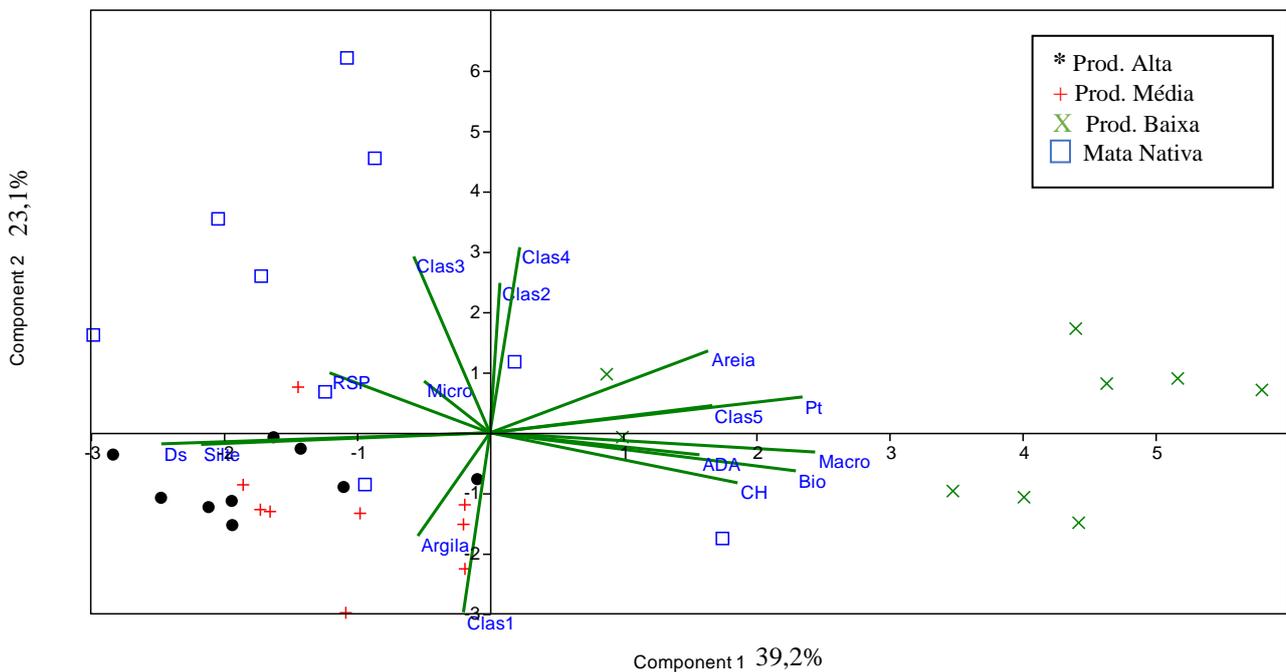
mata nativa (Figura 6), possuindo, no entanto, características físicas mais similares a esta em relação à área de produtividade alta, possivelmente em virtude do maior teor de areia (Tabela 3). LOZANO et al. (2014) indicam que em sistema plantio direto, em razão da rotação de culturas e atividade da macrofauna do solo, a macroporosidade aumenta no decorrer dos anos, podendo ser esse o motivo da similaridade em volume de macroporos e bioporos entre as áreas de lavoura (Tabela 2), como observado nos gráficos de ACP em quase todos os municípios.

A condutividade hidráulica saturada ocupou posição próxima das variáveis macroporos e bioporos, nos três municípios. Esse agrupamento é justificado porque o fluxo de água ocorre nesses poros, especialmente os macroporos, que em solos estruturados são determinantes para fluxo e infiltração de água (RICHART et al., 2005; LOZANO et al., 2014). Porém, em sistema plantio direto o fluxo vertical de água não depende apenas do volume de macroporos, mas também da orientação destes e do volume de bioporos, que são oriundos da atividade biológica e da ação das raízes (LOZANO et al., 2013). Exemplo disso foi a área de produtividade média de Campo Erê, que teve maiores volumes de bioporos e apresentou maior condutividade hidráulica saturada que as demais áreas de lavoura desse município (Tabela 2). Sendo a condutividade hidráulica associada às variáveis mencionadas, sua posição no gráfico de ACP nos três municípios foi relacionada à área de mata nativa. A alta variabilidade dessa variável provavelmente impediu a discriminação entre as áreas de lavoura.

Com exceção de Faxinal dos Guedes, os microporos se associam mais às áreas de lavoura (Figuras 5 e 6), possivelmente pelo efeito do tráfego na diminuição dos poros maiores. Em Faxinal dos Guedes, na figura correspondente ao PCA (Figura 4), essa variável tem certa proximidade à área de mata nativa, o que pode ser ocasionado pela granulometria desse solo, com predominância de areia e silte, cujo arranjo pode formar poros pequenos (RIBEIRO et al., 2007). Com similar característica granulométrica, teores mais altos de areia em relação às demais áreas, as áreas de produtividade média de Chapecó e de produtividade baixa de Campo Erê também estiveram associados a essa variável (figuras 5 e 6) provavelmente por ter uma distribuição de tamanho de partículas mais ampla. Neste caso, o tráfego de máquinas reduziria o espaço entre os poros maiores (LIMA et al., 2005; DE LIMA et al., 2013), gerando poros de menor tamanho. Porém, segundo REICHERT et al. (2007) a diminuição do volume de macroporos decorrente do tráfego de máquinas não necessariamente significa aumento do volume de microporos, tal como reflete a posição dessa variável no

gráfico do ACP (Figura 4), em Faxinal dos Guedes, onde ocupa posição intermediária entre as áreas de lavoura e mata nativa.

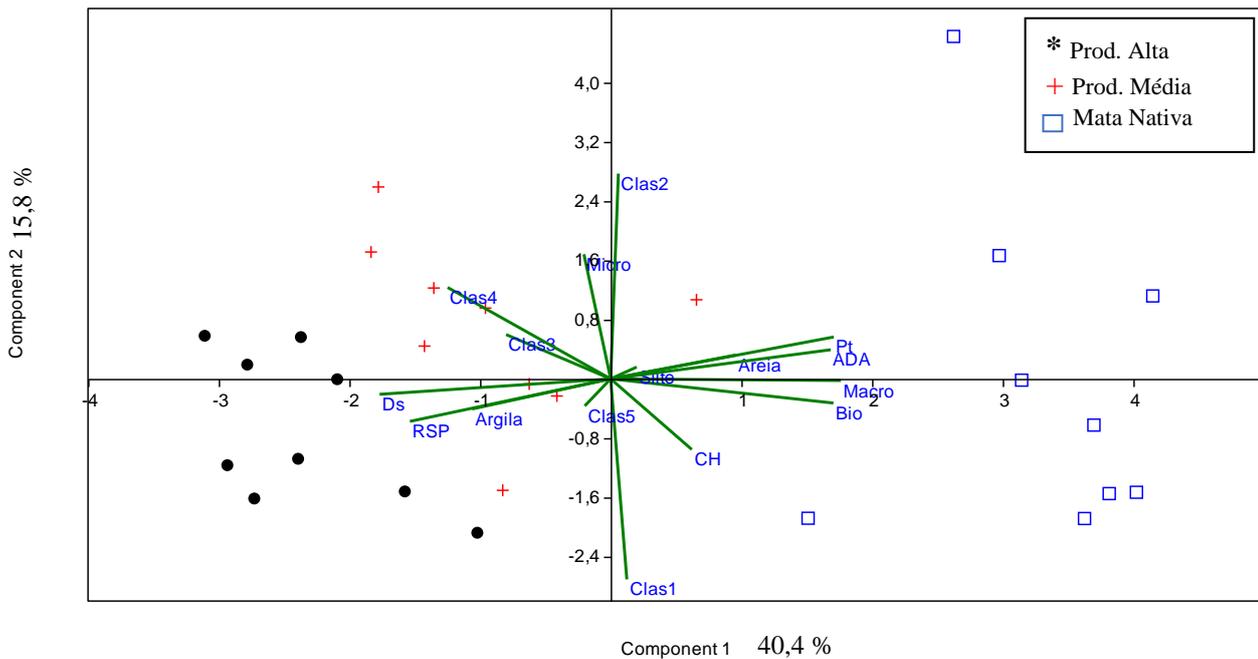
Figura 5 – Análise de componentes principais (ACP) a partir das variáveis do solo, nas áreas de lavoura do município Campo Erê. Densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporos (Macro), bioporos (Bio), microporos (Micro), agregados de classe 1 (Clas1), agregados de classe 2 (Clas2), agregados de classe 3 (Clas3), agregados de classe 4 (Clas4), agregados de Classe 5 (Clas5), condutividade hidráulica saturada (CH), resistência do solo à penetração (RSP), areia (Ar), silte (Sil), argila (Arg), argila dispersa em água (ADA).



Fonte: elaborado pelo autor, 2018.

A porosidade total, por outra parte não mostrou tendência preferencial, sendo em Chapecó e Campo Erê associada à área de mata, e em Faxinal dos Guedes, às áreas de lavoura. As operações de manejo podem aumentar a densidade do solo e reduzir macroporos cujo efeito pode ser maior que o decréscimo da porosidade total, que pode ser menos alterada devido ao aumento da microporosidade, de modo que a porosidade total é menos sensível ao efeito do tráfego (RICHARD et al., 2001; REICHERT et al., 2007).

Figura 6 – Análise de componentes principais (ACP) a partir das variáveis do solo, nas áreas de lavoura e mata nativa do município Chapecó. Densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporos (Macro), bioporos (Bio), microporos (Micro), agregados de classe 1 (Clas1), agregados de classe 2 (Clas2), agregados de classe 3 (Clas3), agregados de classe 4 (Clas4), agregados de classe 5 (Clas5), condutividade hidráulica saturada (CH), resistência do solo à penetração (RSP), areia (Ar), silte (Sil), argila (Arg), argila dispersa em água (ADA).



Fonte: elaborado pelo autor, 2018.

Os agregados da classe 1 estiveram associadas as áreas de lavoura e as frações silte e argila (Figura 4, 5 e 6), enquanto que as demais classes de agregados mostraram tendência oposta à classe 1. Em solos intemperizados, como os solos em questão, a interação eletrostática entre minerais de argila e óxidos impede a expressão de uma hierarquia agregada (SIX et al., 2000; SIX et al., 2004), podendo ser essa a razão da predominância de agregados de classe 1. Além disso, a compressão do solo, produto do tráfego de máquina pode ter contribuído com a agregação nas áreas de lavoura, favorecendo a formação de agregados maiores, tal como reportado por SILVA et al. (2006). Por outra parte, a abundância de frações coloidais é fundamental para a formação e estabilização de agregados (KRAUSE et al., 2018) o que justifica o posicionamento destas variáveis no gráfico do ACP, próximas aos agregados de classe 1.

7 CONCLUSÕES

Nas áreas de lavoura sob sistema de plantio direto a compactação pode ser mais expressiva na camada 5-10 cm em relação à camada mais superficial. Contudo, a compactação não afeta a produtividade de grãos de soja nos níveis observados.

A mudança estrutural do solo nas áreas de lavoura sob sistema plantio direto em comparação a áreas de mata nativa pode estar associada ao aumento da proporção de macroagregados.

8 REFERÊNCIAS

- ADAMS, T.C. et al. Soil property differences among high- and average-yielding soya bean areas in Arkansas, USA. **Soil Use and Management**, v. 34, p. 72–84, 2018.
- ALBUQUERQUE, J.A. et al. Relação de atributos do solo com a agregação de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de verão para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas-SP. v. 9, n. 3, p. 415-424, 2005.
- ALVES, J.R; ELIAS, H.T. Lançamento safra de verão 2017/2018. **Boletim agropecuário - Edição especial**, Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, 12p, 2017.
- AMADO, T.J. et al. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1101-1110, 2007.
- ANTHONY, P. et al. Soybean yield and quality in relation to soil properties. **Agronomy Journal**. USA, v. 104, p. 1443–1458, 2012.
- BEUTLER, A.N; CENTURION, J.F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 7, p. 849-856, 2003.
- BRIEDIS, et al. How does no-till deliver carbon stabilization and saturation in highly weathered soils. **Catena**, Ponta Grossa-PR, v. 163, p. 13-23, 2018.
- BRONICK, C.J; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Columbus, USA, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.

CALONEGO, J.C. et al. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal Agronomy**, Botucatu-SP, v. 85, p. 31–37, 2017.

CAMBARDELLA, C.A & ELLIOTT, E.T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**, Colorado, USA, v. 57, n. 4, p. 1071-1076, 1993.

CARDOSO, E. et al. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 493-501, 2006.

Companhia Nacional de Abastecimento. A produtividade da soja: análise e perspectivas. Compêndio de Estudos CONAB. Brasília, v. 10, 2017. 24p. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 02/10/2018.

Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra Brasileira de grãos. V. 5 - SAFRA 2017/18- N. 10 - Décimo levantamento. Brasília, 2018. p. 1-178. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>

CONTI, M. et al. Soil organic carbon fractions as influenced by soybean cropping in the humid pampa of Argentina. **Terra Latinoamericana**, Buenos Aires, v. 32, n. 3, p. 195-200, 2014.

CORRÊA, M. Ácidos orgânicos de baixo peso molecular e ácidos húmicos e alterações em algumas propriedades físicas e químicas de Latossolos, Plintossolo e Neossolo Quartzarênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG v. 32, n. 1, 2008.

DE LIMA, R.P; DE LEÓN, M; DA SILVA, A. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Ceres**, Viçosa-MG, v. 60, n. 1, 2013.

DE MORAES SÁ, et al. Soil carbon fractions and biological activity based indices can be used to study the impact of land management and ecological successions. **Ecological Indicators**, Ponta Grossa-PR, v. 84, p. 96-105, 2018.

DENARDIN, J; KOCHHANN, R; FAGANELLO, A. Dia Nacional da Conservação do Solo: a agricultura desenvolvida no Brasil é conservacionista. **Boletim Informativo Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha**. Ponta Grossa-PR, v. 40, p. 6-7, 2010.

DENARDIN, J. et al. Agricultura conservacionista no Brasil: uma análise do conceito à adoção. Em: CARVALHO, L; MACIEL, G; ARAÚJO, A. (Org.). **Agricultura Conservacionista no Brasil**. 1ed., Brasília, Embrapa, 1, p. 23-41, 2014.

DEXTER, A.R. et al. Complexed organic matter controls soil physical properties. **Geoderma**. Orléans, França, v. 144, p. 620 – 627, 2008.

DE OLIVEIRA. et al. Macroaggregation and soil organic carbon restoration in a highly weathered Brazilian Oxisol after two decades under no-till. **Science of the Total Environment**, Ponta Grossa-PR, v. 621, p. 1559-1567, 2018.

DUVAL, M.E. et al. Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. **Soil and Tillage Research**, Argentina, vol. 131, p. 11-19, 2013.

DUVAL, M.E. Evaluación de la calidad física de los suelos de la región pampeana: efecto de las prácticas de manejo, 2015. **Revista XXV - Ciencias Agronómicas**. Buenos Aires, v. 25, p. 33-43, 2015

DUVAL, M. et al. Comparación de índices de calidad de suelos agrícolas y naturales basados en el carbono orgánico. **Ciencia del suelo**. Argentina, v. 34, n. 2, p. 197-209, 2016.

DUVAL, M. et al. Labile soil organic carbon for assessing soil quality: influence of management practices and edaphic conditions. **Catena**, Argentina, v. 171, p. 316-326, 2018.

EMBRAPA, Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Soja em números: Safra 2017/2018**. Portal EMBRAPA, (Versão 3.59.4) p 1. Londrina-PR, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1>.

FARIAS, J.R; NEPOMUCENO, A.L; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. Embrapa Soja-Circular Técnica. (**INFOTECA-E**) , Londrina-PR, nº 48, 8p., 2007.

FERNANDES. F.A.; FERNANDES, A.H. Atualização dos métodos de cálculo de estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo. (Embrapa Pantanal. Comunicado Técnico, 95). Corumbá: Embrapa Pantanal, 5p, 2013. Disponível em: <www.cpap.embrapa.br/publicacoes/online/COT95.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2018.

GALANTINI, J.A; SUÑER, L. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. **AGRISCIENTIA**. Bahía Blanca, Argentina, v. 25 (1), p. 41-55, 2008.

GALLARDO, A. et al. Ciclos de nutrientes y procesos edáficos en los ecosistemas terrestres: especificidades del caso mediterráneo y sus implicaciones para las relaciones suelo-planta. **Revista Ecosistemas**, Sevilla, Espanha, v. 18, n 2, p. 4-19, 2009.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis 1. **Soil Science Society of America, American Society of Agronomy**. USA. No. Methods of soil analysis, pp. 383-411, 1986.

HILLEL, D. **Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations**. Elsevier. Massachusetts, USA, 494p, 1998.

HORN, R. Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, Países Baixos, v. 17, n. 3-4, p. 265-289, 1990.

HOORMAN, J; SÁ, J.C; REEDER, R. The biology of soil compaction. **Soil Tillage Research**. USA, v. 68, p. 49-57, 2011.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size Distribution of Aggregates 1. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling, no methodsofsoilana. **Agronomy series**, USA. p. 499-510, 1965.

KLUTHCOUSKI, J. et al. Manejo do solo e o rendimento de soja, milho, feijão e arroz em plantio direto. Embrapa Arroz e Feijão. **Scientia Agricola**, Piracicaba-SP, v. 57, n. 1, p. 97-104, 2000.

KRAUSE, L. et al. Microaggregate stability and storage of organic carbon is affected by clay content in arable Luvisols. **Soil and Tillage Research**, Alemanha, v. 182, p. 123-129, 2018.

KRAVCHENKO, A; BULLOCK, D. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. **Agronomy Journal**. Illinois, USA, v. 92, no 1, p. 75-83, 2000.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo. Água no solo**. Edusp, SP, v. 61, 71p, 2005.

LIMA, H.V. et al. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa-MG, v. 29, p. 677-684, 2005.

LIMA, C.E.P, et al. Compartimentos de carbono orgânico em Latossolo cultivado com hortaliças sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 4, p. 378-387, 2016.

LOZANO, L. et al. Anisotropy of pore size classes' connectivity related to soil structure under no tillage. **Soil Science**, Argentina, v. 178, n. 11, p. 612-617, 2013.

LOZANO, L.A. et al. Stabilization of soil hydraulic properties under a long term no-till system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 38, n. 4, p. 1281-1292, 2014.

LOZANO, L.A. et al. Stabilization of soil hydraulic properties under a long term no-till system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1281-1292, 2014.

LOZANO, L. Soil physical quality and soybean yield as affected by chiseling and subsoiling of a no-till soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 40, 12p, 2016.

MICHELON, C.J. et al. Qualidade física de solos irrigados do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v.37, n.5, p.1308-1315, 2007.

MICHELON, C.J. et al. Qualidade física dos solos irrigados de algumas regiões do Brasil Central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 13, n. 1, p. 39-45, 2009.

MOLINA JUNIOR, W.F. **Comportamento mecânico do solo em operações agrícolas**. Piracicaba: ESALQ/USP, 223p, 2017.

REICHERT, J.M; SUZUKI, L.E; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa-MG, v. 5, p. 49-134, 2007.

REICHERT, J. et al. Mecânica do solo. In: QUIRIN, D. Física do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 1, p.30-98, 2010.

REINERT, D. et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Santa Maria-RS, v. 32, n. 5, 2008.

RICHARD, G. et al. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**, França, v. 52, p. 49-58, 2001.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Seminário: Ciências Agrárias**. Londrina-PR, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

RIBEIRO, K.D. et al. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG, v. 31, n. 4, p. 1167-1175. *Ciência e Agrotecnologia*, 2007.

SALTON, J.C; HERNANI, L.C; FONTES, C. Sistema plantio direto: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: **Embrapa-SPI**; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 1998.

SICZEK, A; LIPIEC, J. Soybean nodulation and nitrogen fixation in response to soil compaction and surface straw mulching. **Soil & Tillage Research**, Polônia, v. 114, p. 50-56, 2011.

SILVA, M.A. et al. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa-MG, v. 30, n. 2, p. 329-337, 2006.

SILVEIRA, P. et al. Efeitos do manejo do solo sob plantio direto e de culturas na densidade e porosidade de um latossolo. **Biosci. J.**, Uberlândia-MG, v. 24, n. 3, p. 53-59, 2008.

SIX, J. et al. Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. **Soil Science Society of America Journal**, USA nº64(2), 681-689, 2000.

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

SORACCO, C. et al. Effects of compaction due to machinery traffic on soil pore configuration. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 39, n. 2, p. 408-415, 2015.

STONE, L.F. et al. Correlação entre a produtividade do feijoeiro no sistema de produção orgânica e atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v.17, n.1, p.19-25, 2013.

SUZUKI, L.E. et al. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1159-1167, 2007a.

SUZUKI, L.; REICHER, J; REINERT, D. Densidade referência do solo e grau de compactação como parâmetro indicador do crescimento das plantas. Trabalho apresentado no XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. **Anais eletrônicos**. Gramado, RS, 2007b.

TORRES, E; SARAIVA, O. Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja. Embrapa Soja, Londrina-PR, 1999.

VALADÃO, F.C. et al. Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa-MG, v. 39, p. 243-255, 2015.

VEZZANI, F.M & MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista brasileira de ciência do solo**. Viçosa-MG, v. 33, n. 4, p. 743-755, 2009.

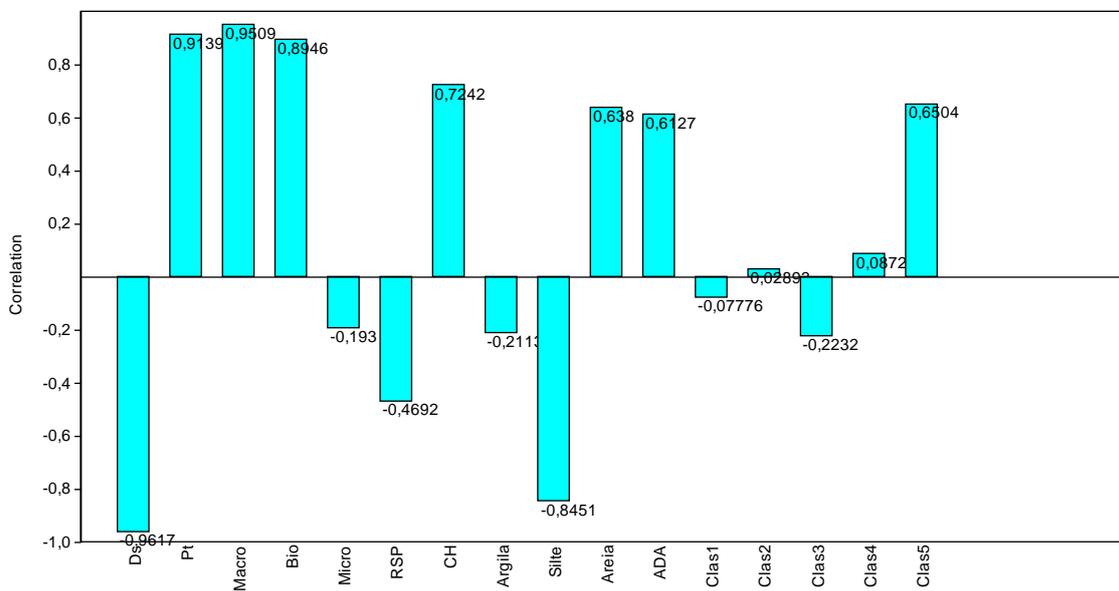
VRDOLJAK, G; SPOSITO, G. Soil aggregate hierarchy in a Brazilian Oxisol. In Developments in Soil Science. **Elsevier**, California, USA, v. 28, p. 197-217, 2002.

WENDLING, B. et al. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Bioscience Journal**, Uberlândia-MG, v. 28, n. 1, p. 256 – 265, 2012.

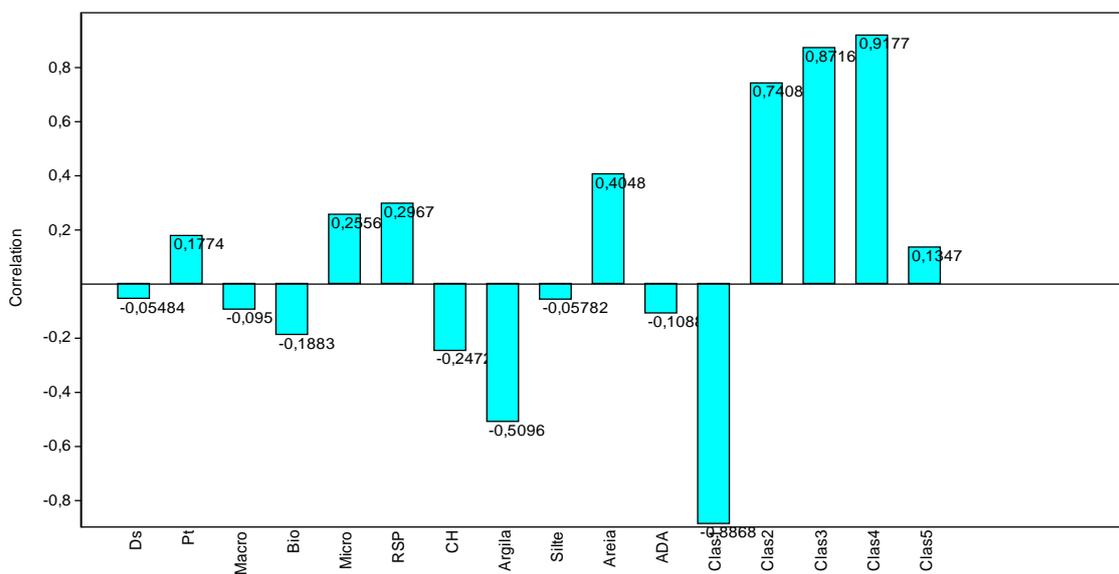
WINGEYER, A.B. et al. Soil Quality Impacts of Current South American Agricultural Practices. **Sustainability**, Entre Ríos-Argentina, v. 7, p. 2213-2242, 2015.

8 APÊNDICES

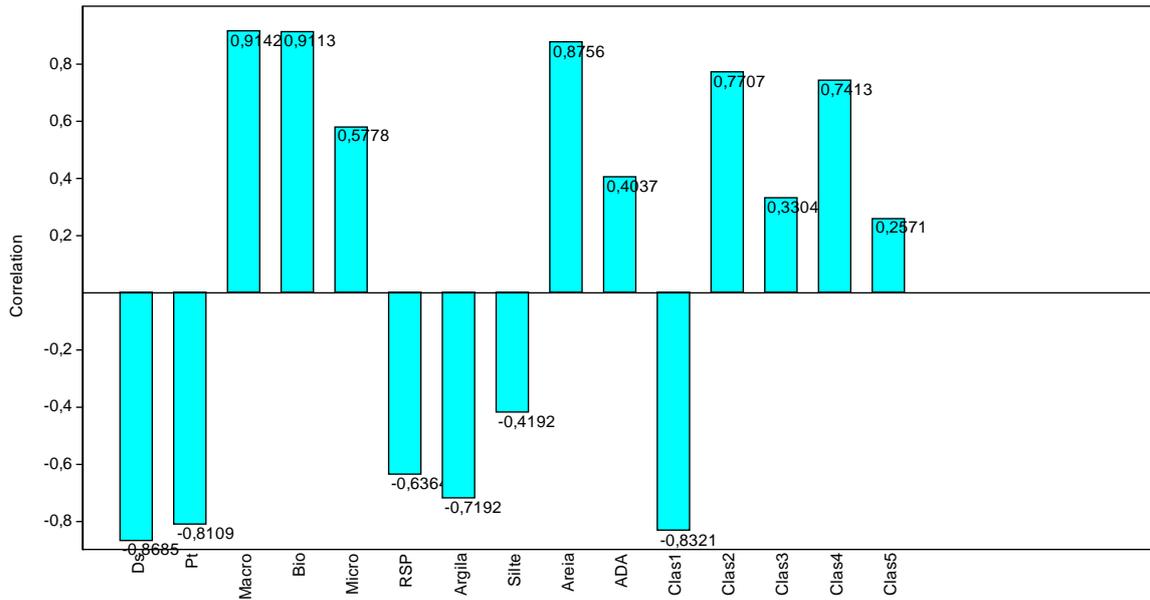
APÊNDICE A – Valores de correlação (*loadings*) das variáveis físicas do solo no componente 1 da ACP, das áreas do município Campo Erê.



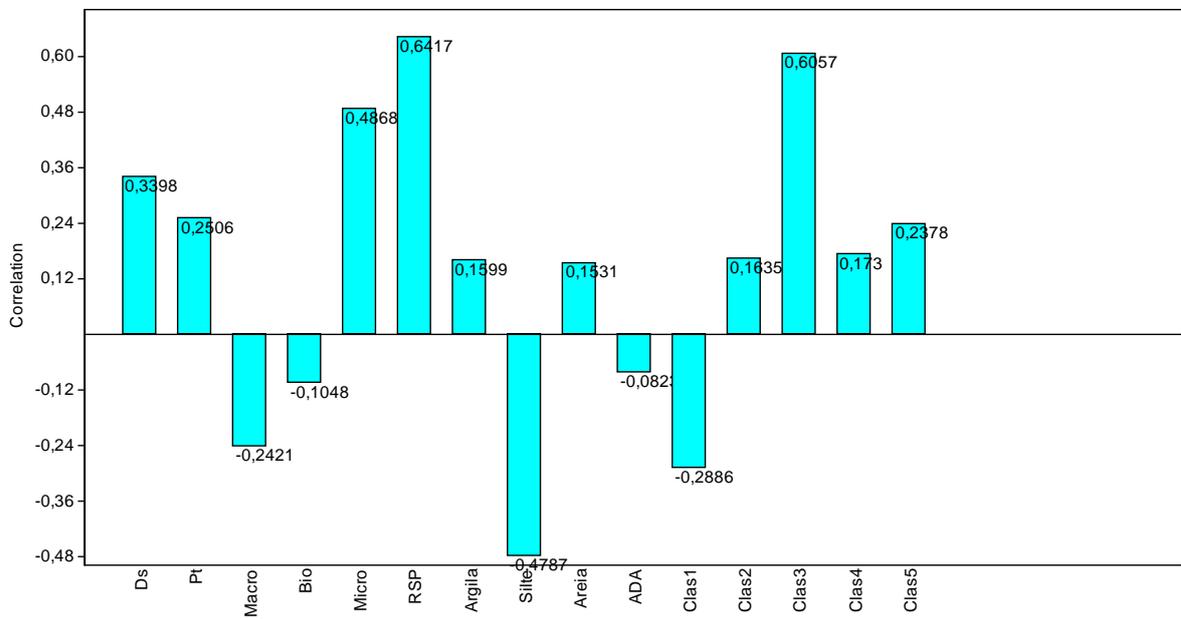
APÊNDICE B– Valores de correlação (*loadings*) das variáveis físicas do solo no componente 2 da ACP, das áreas do município Campo Erê.



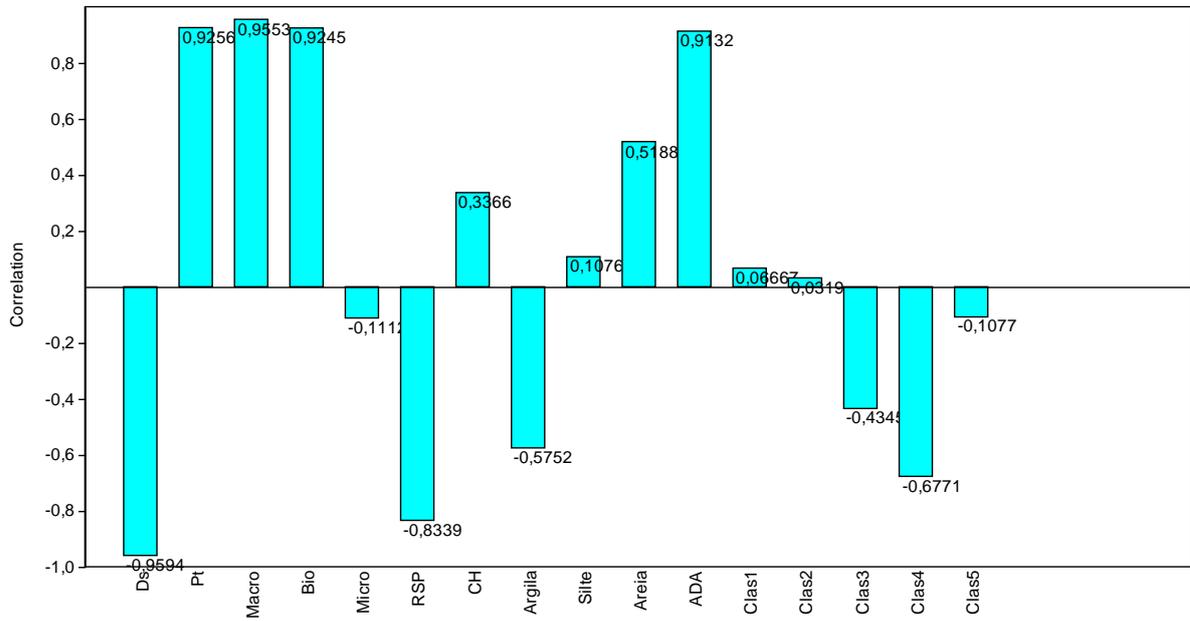
APÊNDICE C– Valores de correlação (*loadings*) das variáveis físicas do solo no componente 1 da ACP, das áreas do município Faxinal dos Guedes.



APÊNDICE D– Valores de correlação (*loadings*) das variáveis físicas do solo no componente 2 da ACP, das áreas do município Faxinal dos Guedes.



APÊNDICE E– Valores de correlação (*loadings*) das variáveis físicas do solo no componente 1 da ACP, das áreas do município Chapecó.



APÊNDICE F– Valores de correlação (*loadings*) das variáveis físicas do solo no componente 2 da ACP, das áreas do município Chapecó.

