



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

BRENDA CRISTYE TONON DEBIASI

**ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS, FÍSICOS E QUÍMICOS
EM LATOSSOLO COM DIFERENTES ESTADOS DE
COMPACTAÇÃO E CULTURAS DE OUTONO-INVERNO
SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Londrina
2018

BRENDA CRISTYE TONON DEBIASI

**ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS, FÍSICOS E QUÍMICOS
EM LATOSSOLO COM DIFERENTES ESTADOS DE
COMPACTAÇÃO E CULTURAS DE OUTONO-INVERNO
SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia - Universidade Estadual de Londrina, área de concentração em Manejo Sustentável do Solo e Engenharia Agrícola, como requisito à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Orientador: Dr. Marco Antonio Nogueira.
Co-orientador: Dr. Henrique Debiasi.

Londrina
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Debiasi, Brenda Cristye Tonon.

Atributos microbiológicos, físicos e químicos em LATOSSOLO com diferentes estados de compactação e culturas de outono-inverno sob sistema plantio direto / Brenda Cristye Tonon Debiasi. - Londrina, 2018.
120 f. : il.

Orientador: Marco Antonio Nogueira.

Coorientador: Henrique Debiasi.

Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2018.
Inclui bibliografia.

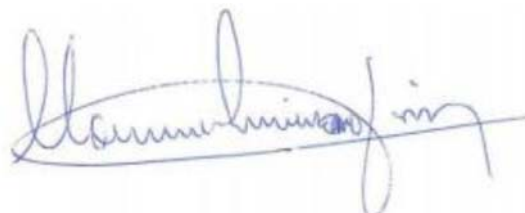
1. Bioindicadores - Tese. 2. Recuperação do solo - Tese. 3. Perfil metabólico - Tese. 4. Qualidade biológica do solo - Tese. I. Nogueira, Marco Antonio. II. Debiasi, Henrique. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

BRENDA CRISTYE TONON DEBIASI

**ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS, FÍSICOS E QUÍMICOS EM
LATOSSOLO COM DIFERENTES ESTADOS DE COMPACTAÇÃO E
CULTURAS DE OUTONO-INVERNO SOB SISTEMA PLANTIO
DIRETO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia - Universidade Estadual de Londrina, área de concentração em Manejo Sustentável do Solo e Engenharia Agrícola, como requisito à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

BANCA EXAMINADORA



Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Nogueira
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária -
Emprapa Soja

Co-orientador: Dr. Henrique Debiasi
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária -
Emprapa Soja

Profa. Dra. Maria de Fátima Guimarães
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Dra. Diva de Souza Andrade
Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR

Dr. Artur B. Lirio Rondina
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária -
Emprapa Soja

Dra. Andrea Scaramal da Silva Menoncin
Universidade Norte do Paraná - Unopar

Londrina, 27 de fevereiro de 2018.

Dedico este trabalho aos meus pais
Oriverto e Audinir Tonon e ao meu
esposo Henrique e nossa filha Vitória.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me concedido vida, saúde e disposição. Sem Ele nada seria possível.

À minha família, sempre presente com suas orações. Aos meus pais, Oriverto e Audinir Tonon, e minha irmã Bárbara e meu cunhado Fernando que sempre me deram amor, exemplo de vida e por todo o carinho e atenção dado a mim nesse período, e por compreender a minha ausência.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marco Antonio Nogueira, não só pela amizade, mas também pelos conhecimentos transmitidos e pela compreensão diante das minhas dificuldades, por ter confiado em mim, mas também por ser um exemplo de dedicação profissional, competência e entusiasmo pelo que faz. Nunca esqueceu que estudante de pós-graduação é, antes de mais nada, colega de profissão, tratando a todos com respeito.

Ao meu co-orientador e esposo, Henrique Debiasi. Você é o que tenho de mais precioso nessa vida. Só sua presença já seria uma grande ajuda para a elaboração dessa tese. Mas você foi mais longe... Obrigado também pelos ensinamentos, pela co-orientação, pela amizade e compreensão além de tudo e pelo amor, apoio e atenção mesmo nos momentos mais difíceis dessa caminhada, pela força, pelas orações e por compreender a minha ausência.

À Dra. Mariangela Hungria, pelos ensinamentos, pela confiança, pelo exemplo pessoal e profissional e pela amizade.

A todos os colegas e amigos do laboratório de Biotecnologia de Solos, da Embrapa Soja, principalmente àqueles com quem convivi mais diretamente: Adalgisa R. Torres, Amanda Paiva, Amanda Pit, Amaral M. Chibeba, Ana Carolina Coqueiro, André S. Nakatani, Andrey B. Cordeiro, Anna K. Grunvald, Artur L. Rondina, Bettina B. Marks, Biana H. Kuwano, Carolina Honda, Dáfila S. L. Fagotti, Débora Bueno, Douglas F. Gomes, Eduara Ferreira, Fabiane Paulitsch, Francine C. de Andrade, Jackson S. Gundi, Jakeline R. M. Delamuta, Jesiane S. S. Batista, João A. P. Pelaquim, Josiane Fukami, Julia L. F. Abrantes, Leandro D. Tullio, Letícia C. Babujia, Ligia M. O. Chueire, Luisa C. F. Helene, Maira R. Costa, Marcos J. de Luca, Marcos Vinícios C. Garcia, Maria Rosa Jacobino, Mariana S. Santos, Paula Cerezini, Rebeca F. Dall'Agnol, Renan A. Ribeiro, Renata C. de Souza, Rinaldo B. Conceição, Talita M. Nogueira, Vitor C. do Nascimento, Vivian N.

M. Cervantes e Walkyria Neiverth, pelos conhecimentos (científicos e não científicos) construídos e compartilhados, por nossa boa convivência diária e pelos cafés. E em especial ao Artur, Carolina, Biana, Vivian e à Ana Coqueiro pelo auxílio na execução da parte prática deste estudo. Aos funcionários e amigos Renan, Lígia, Eduara, D. Rosa, Marcos Vinícios e Rinaldo pelos ensinamentos, orientações e auxílio no laboratório e principalmente pela amizade. E também aos funcionários de campo da área de solos e também área de manejo do solo pela grande ajuda nas coletas de solo.

E quero agradecer em especial aos funcionários do Laboratório de física do solo: Donizete Loni, Mariluci, Esmael e Ildfonso pelo auxílio nas análises físicas e determinações laboratoriais, pelo apoio, por me ajudarem sempre que precisei e pela amizade. E também aos estagiários do laboratório de física de solos.

À UEL e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela oportunidade de cursar o doutorado. Aos professores que colaboraram para a minha formação.

À CAPES e à Fundação Agrisus, pela bolsa de estudos e por possibilitar a realização desse trabalho.

A todos aqueles que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo.”

(Martin Luther King)

DEBIASI, Brenda Cristye Tonon. **Atributos microbiológicos, físicos e químicos em LATOSSOLO com diferentes estados de compactação e culturas de outono-inverno sob sistema plantio direto**. 2018. 120f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

RESUMO

A atividade microbiana e o carbono da biomassa microbiana (CBM) podem ser indicadores sensíveis da melhoria da estrutura do solo proporcionada por espécies vegetais cultivadas na entressafra. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da compactação do solo e de diferentes espécies vegetais de outono-inverno sobre os atributos bioquímicos/microbiológicos e diversidade metabólica do solo, além de selecionar indicadores sensíveis ao estado de compactação (EC) em um LATOSSOLO Vermelho distroférico cultivado em sistema plantio direto (SPD). O experimento foi realizado em Londrina-PR, em blocos ao acaso com três repetições, parcelas subdivididas, sendo quatro espécies vegetais nas parcelas (braquiária ruziziensis, aveia preta, milho 2º safra e trigo), e três ECs nas subparcelas: EC1-SPD escarificado; EC2- SPD e EC3- SPD compactado. Foram realizadas quatro amostragens de solo: out/2014; fev/2015; jan/2016 e fev/2017. Em cada amostragem foram determinados atributos químicos e físicos do solo. Foram obtidas amostras de solo (0-0,1 m de profundidade) para avaliação da respiração basal (RB), e quociente metabólico (qCO_2), CBM (fumigação-extração), além das atividades das enzimas celulase, arilsulfatase, fosfatase ácida e glutaminase no solo. O perfil metabólico foi avaliado em microplacas Biolog Ecoplate® com 31 fontes de carbono. Os dados foram submetidos à ANOVA, médias comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), e à análise canônica discriminante (ACD). Não houve interação significativa entre os ECs e as culturas de outono-inverno para nenhum dos atributos químicos e físicos em todas as épocas de avaliação. No entanto, os ECs influenciaram significativamente todos os atributos físicos avaliados, independentemente da época de amostragem, evidenciando que a escarificação e o tráfego da colhedora promoveram variabilidade na qualidade estrutural do solo. A RB diminuiu com o aumento do EC nas três primeiras amostragens, quando o EC1 e o EC2 apresentaram atividades 68% e 28% maiores que o EC3, respectivamente. O efeito dos ECs sobre o CBM na primeira avaliação variou com as culturas de outono-inverno. O solo do EC3 apresentou o menor valor de CBM sob as culturas de aveia preta e braquiária, EC2 e EC1 apresentaram maiores valores de CBM nas parcelas sob aveia e braquiária. As enzimas do solo foram mais sensíveis ao EC do que a cobertura de outono-inverno. A (ACD) foi mais sensível para discriminar o efeito da cobertura de outono-inverno sobre os atributos microbiológicos e bioquímicos, sendo que a enzima glutaminase foi a mais sensível. O potencial e a taxa de consumo dos substratos orgânicos foram menores no SPD escarificado comparativamente a EC2 e EC3 sob o cultivo de aveia preta ou milho. Nas parcelas sob braquiária, o EC1 apresentou maior potencial e taxa de consumo das fontes de C em relação ao EC2 e EC3, enquanto que a cinética de consumo não foi influenciada pelos ECs sob trigo. O perfil metabólico dos microrganismos foi sensível aos ECs e às culturas de outono-inverno, o que o qualifica como indicador de qualidade biológica do solo.

Palavras-chave: Bioindicadores. Atividade enzimática. Qualidade biológica do solo. Perfil metabólico. Biolog.

DEBIASI, Brenda Cristye Tonon. **Microbiological, physical and chemical attributes in an oxisol submitted to compaction and autumn-winter crops under no tillage system.** 2018. 120p. Thesis (Doctoral degree in Agronomy) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

ABSTRACT

Microbial activity and microbial biomass carbon (MBC) can be sensitive indicators of improved soil structure provided by plant species grown in the off season. The objective of this study was to evaluate the effects of soil compaction and different species of autumn-winter on the soil microbial attributes and metabolic diversity, and select sensitive microbiological indicators of compaction state in an Oxisol under no tillage system (NT). The experiment was carried out in Londrina-PR, in a complete block design, with three replications in a split-plot arrangement, consisting in four species of cover crops in the plot (brachiaria, black oat, winter maize and wheat), and compaction status (CS) in the subplot: CS1- NT chiseled, CS2- NT, and CS3- NT compacted. Chemical and physical soil properties such as density and porosity were determined. In each subplot, soil samples were collected (0-10 cm layer) for assessment of microbiological properties like basal respiration (BR), metabolic quotient (qCO_2), MBC (fumigation-extraction method) and, in addition, enzymatic activities as cellulase, arylsulfatase, acid phosphatase and glutaminase were assessed. The metabolic profile was determined by Biolog Ecoplate® microplate containing 31 sources of carbon. Data were submitted to analysis of variance (ANOVA), comparison of means by Tukey test ($p < 0.05$) and discriminant canonical analysis (DCA). There was no significant interaction between CS and autumn-winter crops for any of the assessed chemical and physical attributes at the 0-0.1 m layer at all seasons. However, CS significantly influenced the assessed physical attributes, regardless of sampling time, showing that scarification and harvester traffic promoted variability in the structural soil quality. The BR decreased with increasing CS in the first three samplings, but the effect disappeared in the fourth sampling. Greatest differences in BR as a function of the CS occurred at the first sampling, when CS1 and CS2 showed activities 68% and 28% higher than CS3, respectively. The effect of CS on MBC in the first evaluation varied with the autumn-winter crops. The CS3 soil showed the lowest value of MBC under black oat and brachiaria, CS2 and CS1 presented higher values of MBC in the oat and brachiaria plots, respectively. Enzyme activities were more sensitive to soil compaction than to autumn-winter covercrops. The DCA was more sensitive to discriminate the effect of autumn-winter coverage on microbiological and biochemical attributes, being the glutaminase activity the most sensitive. The potential and the consumption rate of the organic substrates were lower in the chiseled NT (CS1) compared with CS2 and CS3 under black oats or corn. Conversely, CS1 presented higher potential and consumption rate of C sources compared with CS2 and CS3 in the plots cultivated with brachiaria, whereas the consumption kinetics was not influenced by CS under wheat. The microbiological metabolic profile was sensitive to the CS and autumn-winter cover crops, making it a reliable indicator of soil biological quality.

Keywords: Bioindicators. Enzymatic activity. Biological soil quality. Metabolic profile. Biolog.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Artigo A - ATRIBUTOS BIOQUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS EM LATOSSOLO SUBMETIDO À COMPACTAÇÃO E CULTURAS DE OUTONO INVERNO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO.

- Figura 3.1 - Respiração basal (RB) (a), carbono da biomassa microbiana (CBM) (b) e quociente metabólico (qCO_2) (c) de amostras coletadas em quatro épocas, na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, sob diferentes estados de compactação (EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional porito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg)46
- Figura 3.2 - Desdobramento da interação entre os estados de compactação do solo (EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional porito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg) e as culturas de outono-inverno para a variável carbono da biomassa microbiana (CBM), determinada em amostras da camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico, coletadas em outubro/2014.....47
- Figura 3.3 - Respiração basal (RB) (a), carbono da biomassa microbiana (CBM) (b) e quociente metabólico (qCO_2) (c) de amostras coletadas em quatro épocas, na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, sob diferentes culturas de outono-inverno49
- Figura 3.4 - Atividade das enzimas fosfatase ácida (a), celulase (b), arilsulfatase (c) e glutaminase (d) em amostras coletadas em quatro épocas, na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, sob diferentes estados de compactação (EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional porito passadas de uma colhedora

	com massa de 9,6 Mg).....	50
Figura 3.5 -	Atividade das enzimas fosfatase ácida (a), celulase (b), arilsulfatase (c) e glutaminase (d) de amostras coletadas em quatro épocas, na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, sob diferentes culturas de outono-inverno	51
Figura 3.6 -	Relação da densidade do solo (DS) (a, c, e, g) e macroporosidade (Macro) (b, d, f, h) de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso com os escores das variáveis canônicas estimadas pela função canônica discriminante 1 (FCD1), na 1 ^a (a,b), 2 ^a (c, d), 3 ^a (e, f) e 4 ^a (g, h) épocas de avaliação. ns = equação não significativa (teste F, p>0,05); ** equação significativa (teste F, p<0,01).....	62
Figura 3.7 -	Relação da densidade do solo (DS) (a) e macroporosidade (Macro) (b) de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso com os escores médios das variáveis canônicas estimadas pela função canônica discriminante 2 (FCD2). ns = equação não significativa (teste F, p>0,05); * = equação significativa (teste F, p<0,05)	63
 Artigo B - ALTERAÇÃO DA DIVERSIDADE METABÓLICA INDUZIDA PELA COMPACTAÇÃO E PLANTAS DE COBERTURA EM UM SOLO OXÍDICO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO.		
Figura 4.1 -	Desenvolvimento de cor nos poços contendo as 31 fontes de C e os respectivos controles, em triplicata, nas microplacas Biolog EcoPlate®, após 96 horas de incubação de amostras de solo coletadas em fevereiro/2017 na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico, em função dos estados de compactação [EC1, SPD escarificado (a, d, g, j); EC2, SPD sem compactação adicional e sem escarificação (b, e, h, k); EC3, SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg (c, f, i, l)] e das culturas semeadas no outono-inverno [aveia preta (a, b, c); braquiária ruziziensis (d, e, f); milho (g, h, i); e trigo (j, k, l)]......	87

- Figura 4.2 - Índice de diversidade de Shannon (H'), obtido com base no uso de fontes de carbono nas microplacas Biolog EcoPlate® pela comunidade microbiana, em solo coletado em fevereiro/2017 na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico, sob cultivo de aveia preta (a), braquiária ruzizensis (b), milho (c) e trigo (d) no outono inverno e diferentes estados de compactação (EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg)90
- Figura 4.3 - Riqueza de substratos (S_s), obtida com base no uso de fontes de carbono nas microplacas Biolog EcoPlate® pela comunidade microbiana, em solo coletado em fevereiro/2017 na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico, sob cultivo de aveia preta (a), braquiária ruzizensis (b), milho (c) e trigo no outono inverno e diferentes estados de compactação (EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg)91
- Figura 4.4 - Cinética do desenvolvimento médio de cor (*average well colour development* - AWCD) pelo uso das fontes de carbono em microplacas Biolog EcoPlate® inoculadas com solo coletado em fevereiro/2017 na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico sob cultivo de aveia preta (a), braquiária ruzizensis (b), milho (c) e trigo (d) no outono-inverno, e diferentes estados de compactação (EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg)93

LISTA DE TABELAS

Artigo A - ATRIBUTOS BIOQUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS EM LATOSSOLO SUBMETIDO À COMPACTAÇÃO E CULTURAS DE OUTONO INVERNO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO.

- Tabela 3.1 - Atributos químicos da camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, sob diferentes estados de compactação e por culturas de outono-inverno, em quatro épocas de avaliação.....42
- Tabela 3.2 - Atributos físicos da camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, sob diferentes estados de compactação e por culturas de outono-inverno, em duas épocas de avaliação.....44
- Tabela 3.3 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os atributos microbiológicos e atributos físico-químicos de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso sob diferentes estados de compactação e coberturas de outono-inverno, em amostragem realizada na camada de 0,0-0,1 m em outubro de 201452
- Tabela 3.4 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os atributos microbiológicos e atributos físico-químicos de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso sob diferentes estados de compactação e coberturas de outono-inverno, em amostragem realizada na camada de 0,0-0,1 m em janeiro de 201554
- Tabela 3.5 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os atributos microbiológicos e atributos químicos de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso sob diferentes estados de compactação e coberturas de outono-inverno, em amostragem realizada na camada de 0,0-0,1 m em fevereiro de 201655
- Tabela 3.6 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os atributos microbiológicos e atributos físico-químicos de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso sob diferentes estados de compactação e coberturas de outono-inverno, em amostragem realizada na camada de 0,0-0,1 m em fevereiro de 201756

Tabela 3.7 - Coeficientes canônicos padronizados (CCP) das funções canônicas discriminantes (FCD) 1 e 2, coeficientes de correlação canônicos (r) e taxa de discriminação paralela (TDP) para os atributos microbiológicos e bioquímicos de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, que discriminam significativamente (teste F, $p < 0,005$) os diferentes estados de compactação do solo (EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg) em quatro épocas de avaliação.....	60
Tabela 3.8 - Escores canônicos padronizados estimados pelas funções canônicas discriminante (FCD) 1 e 2 em diferentes estados de compactação (EC) de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, em quatro épocas de avaliação	61
Tabela 3.9 - Coeficientes canônicos padronizados (CCP) das funções canônicas discriminantes (FCD) 1 e 2, coeficientes de correlação canônicos (r) e taxa de discriminação paralela (TDP) para os atributos microbiológicos e bioquímicos de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, que discriminam significativamente (teste F, $p < 0,005$) as diferentes culturas de outono-inverno (aveia preta, braquiária ruzizensis, milho e trigo) em quatro épocas de avaliação.....	65
Tabela 3.10 -Variáveis canônicas estimadas pelas funções canônicas discriminantes (FCD) 1 e 2 em diferentes culturas de outono-inverno implantadas sobre LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, em quatro épocas de avaliação	66

Artigo B - ALTERAÇÃO DA DIVERSIDADE METABÓLICA INDUZIDA PELA COMPACTAÇÃO E PLANTAS DE COBERTURA EM UM SOLO OXÍDICO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO.

Tabela 4.1 - Coeficientes empíricos do modelo logístico de Lindström, Barry e Braddock (1998), representando a cinética de desenvolvimento médio de cor (<i>average well colour</i>	
--	--

development - AWCD) pelo uso das fontes de carbono em microplacas Biolog EcoPlate® inoculadas com solo coletado em fevereiro/2017 na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico, em função dos estados de compactação (EC) e das culturas de outono-inverno.....92

Tabela 4.2 - Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos microbiológicos/ bioquímicos, físicos, químicos e os atributos relacionados à diversidade metabólica da comunidade bacteriana de um LATOSSOLO Vermelho distroférico sob diferentes estados de compactação e coberturas de outono-inverno, em amostragem realizada na camada de 0,0-0,1 m em fevereiro/201795

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACD	Análise Canônica Discriminante
ArIS	Arilsulfatase
AWCD	Desenvolvimento Médio de Cor (Average Well Colour Development)
CBM	Carbono da Biomassa Microbiana
CCP	Coeficientes Canônicos Padronizados
CEL	Celulase
CL	Carbono Lábil
C/N	Relação Carbono/Nitrogênio
COT	Carbono Orgânico Total
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
DS	Densidade do Solo
EC	Estados de Compactação
FCD	Funções Canônicas Discriminantes
FOSF	Fosfatase Ácida
GLU	Glutaminase
H'	Índice de Diversidade de Shannon
ILP	Integração Lavoura-Pecuária
Macro	Macroporosidade
Micro	Microporosidade
MOS	Matéria Orgânica do Solo
N	Nitrogênio
NT	Nitrogênio Total do Solo
PC	Plantio Convencional
PT	Porosidade Total
$q\text{CO}_2$	Quociente Metabólico
r	Coeficientes de Correlação Canônicos
RB	Respiração Basal
RP	Resistência à Penetração
S	Riqueza de substratos
SPD	Sistema Plantio Direto
TDP	Taxa de Discriminação Paralela
V%	Saturação por Bases(porcentagem)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	SISTEMA PLANTIO DIRETO E COMPACTAÇÃO DO SOLO.....	21
2.2	EFEITO DA COMPACTAÇÃO NAS PROPRIEDADES MICROBIOLÓGICAS DO SOLO	22
2.3	RECUPERAÇÃO DE SOLOS COMPACTADOS.....	24
2.4	EFEITOS DA DIVERSIFICAÇÃO DE CULTURAS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MICROBIOLÓGICAS DO SOLO.....	26
2.5	INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DE QUALIDADE DO SOLO	29
2.5.1	Atividade e Carbono da Biomassa Microbiana.....	30
2.5.2	Quociente Metabólico (qCO_2).....	31
2.5.3	Atividade Enzimática	32
2.5.4	Diversidade Metabólica de Comunidades Bacterianas	33
3	ARTIGO A: ATRIBUTOS BIOQUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS EM LATOSSOLO SUBMETIDO À COMPACTAÇÃO E CULTURAS DE OUTONO-INVERNO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO	35
	RESUMO	35
	ABSTRACT	36
3.3	INTRODUÇÃO	37
3.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	38
3.4.1	Caracterização da Área e do Experimento.....	38
3.4.2	Atributos Microbiológicos e Bioquímicos do Solo	40
3.4.3	Análise Estatística	40
3.5	RESULTADOS	41
3.5.1	Atributos Químicos do Solo.....	41
3.5.2	Atributos Físicos do Solo.....	44
3.5.3	Atributos Microbiológicos e Bioquímicos	45
3.5.4	Correlação entre Atributos Físicos-Químicos e Atributos	

	Microbiológicos e Bioquímicos do Solo	51
3.5.5	Análise Canônica Discriminante	57
3.6	DISCUSSÃO	67
3.7	CONCLUSÕES	77
4	ARTIGO B: ALTERAÇÃO DA DIVERSIDADE METABÓLICA INDUZIDA PELA COMPACTAÇÃO E PLANTAS DE COBERTURA EM UM SOLO OXÍDICO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO	78
	RESUMO	78
	ABSTRACT	79
4.3	INTRODUÇÃO	80
4.4	MATERIAL E MÉTODOS	81
4.4.1	Caracterização da Área e do Experimento	81
4.4.2	Análises Química e Física	83
4.4.3	Diversidade Metabólica da Comunidade Bacteriana do Solo	84
4.4.4	Análise Estatística	85
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
4.6	CONCLUSÕES	99
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
	REFERÊNCIAS	102
	ANEXOS	118
	ANEXO A - Croqui do experimento realizado em Londrina-PR, em um LATOSSOLO Vermelho distroférico, instalado em 2013 sob sistema plantio direto, com delineamento experimental de blocos ao acaso com três repetições, em parcelas subdivididas, compreendendo quatro culturas de outono-inverno nas parcelas e três estados de compactação (EC) do solo nas subparcelas	118
	ANEXO B - Fontes de carbono contidas nas microplacas Biolog Ecoplate® (Biolog Inc., Hayward, Califórnia) e os grupos funcionais a que	

pertencem de acordo com Insan (1997).....119

1 INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto (SPD) é reconhecido como o sistema de manejo do solo mais importante para a sustentabilidade dos agroecossistemas brasileiros, sobretudo na produção de grãos, como a soja (*Glycine max* L. Merrill). O SPD pode proporcionar benefícios em comparação ao plantio convencional como melhor conservação da água no solo, incremento nos teores de carbono orgânico total, aumento da biomassa microbiana na camada superficial do solo, diminuição da temperatura máxima diária do solo em regiões tropicais, e aumento da biodiversidade do solo. No entanto, alguns problemas podem surgir, como a ocorrência de compactação do solo. As causas relacionadas à compactação no SPD ainda são pouco conhecidas, dificultando o estabelecimento e a adoção de estratégias visando à sua prevenção.

Uma das formas de melhorar a qualidade física de solos compactados são sistemas de rotação de culturas envolvendo espécies com elevado potencial de produção de fitomassa da parte aérea e com sistema radicular abundante e agressivo, capaz de romper camadas compactadas e produzir bioporos através dos quais as raízes das culturas sucessoras podem crescer (SILVA; ROSOLEM, 2002). Diversos trabalhos de pesquisa têm comprovado o efeito positivo de espécies vegetais na redução do grau de compactação de solos cultivados, mesmo no curto prazo (NICOLOSO et al., 2008; COSTA et al., 2011). Ao contrário dos poros produzidos pela mobilização mecânica do solo, os bioporos são longos e contínuos e, assim, de alta eficiência para a transmissão de água e ar (Oades, 1993). Assim, o cultivo de espécies como a aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) e a braquiária ruziziensis (*Urochloa ruziziensis*) pode diminuir o grau de compactação do solo, aumentando a porosidade e, assim, resultar em um ambiente favorável aos microrganismos.

Além da compactação, a degradação do solo pelo cultivo também ocorre por processos erosivos, redução dos teores de matéria orgânica, perda de nutrientes, redução da atividade e diversidade da comunidade microbiana, redução de atividades enzimáticas atuantes nos ciclos biogeoquímicos e aumento da acidez. Atividades enzimáticas são bons indicadores da qualidade de solo porque são sensíveis a mudanças no manejo, como o aporte de resíduos vegetais, compactação do solo, sistema de cultivo e rotação de culturas.

A atividade microbiana e enzimática do solo, podem ser alteradas de acordo com o grau de compactação do solo, com efeito nos processos relacionados à ciclagem de C e nutrientes, além de modificar quali e quantitativamente a comunidade microbiana. O maior grau de compactação do solo pode resultar em alteração quantitativa e/ou qualitativa do domínio *Archaea* em relação ao domínio *Bacteria* no solo, e tem mais efeito sobre a comunidade microbiana do que a espécie vegetal usada no inverno em rotação com a soja. Portanto, o presente trabalho tem como objetivos avaliar os efeitos da compactação do solo e de diferentes espécies vegetais de outono-inverno sobre os atributos microbiológicos e bioquímicos, e sobre a diversidade metabólica de comunidades microbianas, visando selecionar indicadores microbiológicos sensíveis ao estado de compactação do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SISTEMA PLANTIO DIRETO E COMPACTAÇÃO DO SOLO

O Brasil é referência mundial no uso do sistema plantio direto (SPD), com mais de 32 milhões de hectares em produção de grãos em 2013/14(FEBRAPDP, 2018), cerca de 50% da área cultivada do país, e, no estado do Paraná, alcança 90% (DALL'AGNOL; SILVA FILHO, 2018).

O SPD, também chamado de sistema de semeadura direta, é reconhecido como o manejo do solo mais importante para a sustentabilidade dos agroecossistemas brasileiros, sobretudo na produção de grãos, como a soja (*Glycine max* L. Merrill). O uso do SPD pelos agricultores se baseia principalmente pela redução de custos de combustível e máquinas agrícolas, redução da necessidade de mão de obra e redução da erosão do solo(LAL, 2007). Além disso, dependendo das condições ambientais, o SPD pode proporcionar outros benefícios em comparação ao plantio convencional como: melhor conservação da água no solo (ALVAREZ; STEINBACH, 2009; PUTTE et al., 2010; JIN et al.,2011); incremento nos teores de carbono orgânico total (BHATTACHARYYAet al., 2009; BABUJIA et al., 2010); aumentona biomassa microbiana na camada superficial do solo (BABUJIA et al., 2010); reduçãoda temperatura máxima diária do solo em regiões tropicais(DERPSCH; SIDIRAS; ROTH, 1986) e aumento da biodiversidade do solo (ADL; COLEMAN; READ, 2005).

No entanto, alguns problemas ainda persistem, como a ocorrência de compactação do solo (DEBIASI et al., 2010). Essa característica é observada em quase todas as áreas sob SPD, principalmente sob solos de textura argilosa, sendo que a camada subsuperficial apresenta o maior grau de compactação (FRANCHINI et al., 2011).

As causas relacionadas à formação de camadas compactadas no SPD ainda são pouco conhecidas, dificultando o estabelecimento e a adoção de estratégias visando à sua prevenção. Em geral, a formação de camadas compactadas no SPD tem sido atribuída às pressões impostas pelas máquinas agrícolas e/ou pisoteio animal (DEBIASI et al., 2008). No entanto, outros fatores podem estar envolvidos no processo de degradação estrutural da camada

subsuperficial do solo no SPD.

Em termos biológicos, a utilização de sistemas de rotação de culturas caracterizados por um aporte de fitomassa inferior à demanda de carbono pela microbiota conduz à diminuição do teor de matéria orgânica do solo (DIEKOW, 2003). Esse fato, associado ao emprego de plantas com baixo potencial de produção de raízes, promove a desestabilização dos macroagregados, os quais acabam, ao longo do tempo, reduzidos a microagregados ou partículas primárias (GOLDCHIN; BALDOCK; OADES, 1997), o que pode aumentar o grau de compactação mesmo na ausência de tráfego. De acordo com Debiasi et al. (2015), os fatores que conduzem à degradação da qualidade estrutural do solo no SPD tem se manifestado fortemente quando da adoção contínua da sucessão soja/milho 2ª safra.

Além de aumentar a resistência do solo à penetração (CAVALIERI et al., 2006; MORAES et al., 2012; MORAES et al., 2014), o que limita a profundidade e o volume de solo explorado pelas raízes em busca de água e nutrientes (COLLARES et al., 2008; BERGAMIN et al., 2010), a compactação reduz a porosidade total, macroporosidade, capacidade de infiltração de água, aeração e condutividade hidráulica (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). Essas modificações podem alterar os microhabitats e, conseqüentemente, influenciar na distribuição e atividade dos microrganismos e na diversidade da comunidade microbiana do solo (PENGTHAMKEERATI; MOTAVALLI; KREMER, 2011), além de diminuir a produtividade das culturas, especialmente em anos secos e/ou com excesso de chuvas (TORRES; SARAIVA, 1999), bem como aumentar as perdas de nutrientes, as emissões de gases causadores do efeito estufa, a poluição dos recursos hídricos, alterando o ciclo hidrológico (LIPIEC; ARVIDSSON; MURER, 2003).

2.2 EFEITO DA COMPACTAÇÃO NAS PROPRIEDADES MICROBIOLÓGICAS DO SOLO

A compactação do solo é um problema ambiental mundial de crescente importância que ocorre tanto em áreas cultiváveis e pastagens, bem como em solos florestais (BEYLICH et al., 2010). Pode ser causada pela pressão externa de máquinas, pelo pisoteio animal (DEBIASI et al., 2008), ou pode ser por processo natural de acomodação das partículas de solo (HAMZA; ANDERSON, 2005).

Geralmente, a compactação do solo afeta as propriedades físicas do solo, aumentando sua densidade e alterando sua porosidade (PAGLIAI et al., 2003; PAGLIAI; VIGNOZZI; PELLEGRINI, 2004). Como resultado, há uma redução das funções dos macroporos, como infiltração de água, condutividade hidráulica (HORN et al., 1995; RICHARD et al., 2001) e aeração (CZYZ, 2004) levando a um aumento do potencial de escoamento superficial da água, erosão do solo e efeitos desfavoráveis no crescimento das plantas (HORN et al., 2000).

As alterações ocasionadas pela compactação nos fluxos de ar e água do solo podem modificar a composição e a atividade microbiana, influenciando ainda parâmetros fisiológicos dos microrganismos. No entanto, poucos estudos têm sido realizados com o objetivo de avaliar o efeito do grau de compactação sobre a microbiota do solo. Shestak e Busse (2005) simularam diferentes graus de compactação aplicando pressões crescentes a amostras indeformadas de um solo de textura média. Os autores concluíram que a abundância, composição e atividade da microbiota do solo não foram influenciadas pelo grau de compactação, mas esse efeito pode se tornar evidente em longo prazo. Beylich et al. (2010) ressaltam que os efeitos da compactação do solo sobre a biomassa e respiração microbiana variam em função das condições experimentais e ambientais, considerando ensaios de campo. Entretanto, em experimentos sob condições controladas, os autores explicam que a análise conjunta de diversos estudos mostrou tendência de redução da biomassa e respiração em função do aumento da densidade do solo.

Dick, Myrold e Kerle (1988) encontraram correlações negativas significativas entre a densidade do solo (DS) e o carbono da biomassa microbiana (CBM) e a atividade de diversas enzimas (desidrogenase, fosfatase, arilsulfatase e amilase), principalmente na camada de 0,1-0,2 m de profundidade. Pengthamkeerati, Motavalli e Kremer (2011) simularam diferentes graus de compactação aplicando pressões crescentes a amostras indeformadas de solo. Os autores concluíram que as modificações no microhabitat do solo, resultantes do alto grau de compactação imposto em laboratório, tiveram influência negativa sobre o carbono orgânico total, atividade enzimática, biomassa e diversidade microbianas. Efeitos negativos da compactação sobre o CBM, respiração microbiana e dinâmica do nitrogênio (N) no solo também foram observados por Silva (2005).

De acordo com Grigal (2000), a compactação modifica a estrutura da comunidade microbiana do solo, afetando as funções e processos no solo. Assim, os

resultados existentes na literatura indicam a possibilidade de que atributos microbiológicos sejam sensíveis a alterações na qualidade física, podendo se constituir em indicadores eficientes do grau de compactação do solo.

2.3 RECUPERAÇÃO DE SOLOS COMPACTADOS

A escarificação tem sido indicada como alternativa ao rompimento de camadas compactadas de solo no SPD (KLEIN; CAMARA, 2007). Embora ela seja capaz de romper camadas compactadas de solo de modo imediato (UNGER; KASPAR, 1994), os seus efeitos persistem, em geral, por um período efêmero, igual ou inferior a um ano (VEIGA et al., 2007), uma vez que essa operação não elimina a causa do problema (FRANCHINI et al., 2009). Nesse sentido, é possível que os efeitos da escarificação sejam prolongados mediante o emprego de práticas de manejo do solo que estabilizem a estrutura formada, como a adição de matéria orgânica e a utilização de plantas de cobertura dotadas de um sistema radicular abundante (CHAMEN et al., 2003). Por outro lado, a escarificação nem sempre resulta em aumentos na produtividade das culturas (KLEIN; CAMARA, 2007). A resposta das plantas a esse tipo de manejo parece depender da espécie vegetal, das condições climáticas durante o ciclo de desenvolvimento e, principalmente, do grau de compactação inicial (DEBIASI, 2008).

O uso de hastes sulcadoras em semeadoras adubadoras, em substituição aos discos duplos, é outra estratégia que pode reduzir os efeitos da compactação no SPD sobre o desenvolvimento das plantas. Além de aumentar a demanda de potência e de energia e diminuir a capacidade operacional do conjunto trator-semeadora, nem sempre o uso de hastes sulcadoras aumenta a produtividade das culturas (SILVA, 2003). A resposta das culturas à profundidade de atuação das hastes parece estar relacionada à disponibilidade hídrica e ao estado de compactação do solo. Assim, sob condições de deficiência hídrica, em solos com níveis de compactação superficiais críticos às plantas, é possível que as mesmas respondam positivamente ao uso de hastes sulcadoras em semeadoras adubadoras, conforme detectado por Conte et al. (2009).

Outra medida indicada para a recuperação de solos compactados envolve o uso de plantas com elevado potencial de produção de fitomassa e dotadas de um sistema radicular agressivo, capaz de produzir bioporos através dos quais as

raízes das culturas podem crescer (SILVA; ROSOLEM, 2002). Ao contrário dos poros produzidos pela mobilização mecânica do solo, os bioporos são longos e contínuos e, assim, de alta efetividade para a transmissão de água e ar (OADES, 1993).

Algumas gramíneas forrageiras, como braquiária, milheto, sorgo e capim sudão, têm grandes sistemas radiculares com alta habilidade para explorar o perfil do solo. Em contrapartida, as espécies com sistemas de raízes pivotantes, como guandu, crotalária juncea e o nabo têm menos raízes, mas têm maior capacidade de romper as camadas de solo compactadas (ROSOLEM et al., 2002). Assim, Tavares-Filho et al. (2006) recomendam que sistemas que incluam a rotação de culturas e a adoção de culturas de cobertura devem ser a primeira opção para melhorar a qualidade física do solo em áreas sob SPD.

Existem poucos trabalhos de pesquisa a respeito da eficiência e do tempo necessário para que as culturas de cobertura reduzam o grau de compactação do solo a níveis não limitantes ao crescimento das plantas. Assim, persistem dúvidas quanto à eficiência dessa prática, principalmente no que se refere à produtividade e desempenho econômico das culturas durante o período de recuperação do solo, que pode ser longo (CORSINI; FERRAUDO, 1999). Os resultados encontrados são contraditórios, de modo que em alguns trabalhos, as plantas de cobertura foram capazes de recuperar, ao menos parcialmente, a qualidade física do solo (DEBIASI et al., 2008; NICOLOSO et al., 2008; DEBIASI et al., 2010), enquanto que, em outros, esse efeito não foi observado (GENRO JUNIOR; REINERT; REICHERT, 2004; GENRO JUNIOR et al., 2009). A falta de uma resposta consistente ao uso de métodos biológicos de recuperação de solos compactados, em termos de melhoria da qualidade física do solo, pode estar relacionada à baixa sensibilidade dos indicadores físicos tradicionalmente utilizados como DS, porosidade e resistência à penetração (RP) em detectar alterações no volume, geometria e continuidade dos bioporos (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). Assim, métodos de avaliação alternativos, como o perfil cultural (TAVARES FILHO et al., 1999) e atributos microbiológicos do solo (MURPHY, 1986; BULLOCK et al., 1985), bem como parâmetros ecofisiológicos (como fotossíntese, fluxo de seiva e conteúdo relativo de água), podem ser úteis na detecção de melhorias da qualidade física do solo pelo uso de plantas de cobertura.

Existem poucas informações a respeito do grau de compactação

acima do qual a recuperação por métodos biológicos torna-se técnica e economicamente inviável. Reinert et al. (2008), trabalhando em um ARGISSOLO arenoso, concluíram que o sistema radicular de todas culturas de cobertura testadas (nabo forrageiro, *Crotalaria juncea*, guandu-anão, mucuna cinza e feijão-de-porco) conseguiu penetrar em camadas de solo com moderado grau de compactação ($1,75-1,85 \text{ Mg m}^{-3}$), podendo, assim, contribuir para a recuperação física do solo. No entanto, as raízes de nenhuma das espécies foram capazes de crescer através de camadas de solo com elevado grau de compactação ($> 1,85 \text{ Mg m}^{-3}$), evidenciando que, nessa situação, a recuperação física requer intervenção mecânica.

2.4 EFEITOS DA DIVERSIFICAÇÃO DE CULTURAS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MICROBIOLÓGICAS DO SOLO

No SPD, a estratégia mais adequada para melhorar a qualidade estrutural do solo é a adoção de sistemas diversificados de produção agrícola, envolvendo espécies com elevado potencial de produção de fitomassa da parte aérea e com sistema radicular abundante e profundo. Tal recomendação baseia-se principalmente na formação de agregados (SILVA; MIELNICZUK, 1997) e na abertura de bioporos (SILVA; ROSOLEM, 2002) pelo sistema radicular das plantas envolvidas nos sistemas de rotação, bem como no aumento do teor de matéria orgânica do solo (MOS) (OADES, 1993).

Ao contrário dos poros produzidos pela mobilização mecânica do solo, os bioporos são longos e contínuos e, assim, de alta efetividade para a transmissão de água e ar (OADES, 1993). Dexter (1991) assinala que os bioporos não modificam a densidade média do solo, pois a acomodação das raízes é feita à custa da redução do espaço poroso do solo localizado ao redor das mesmas. Mesmo assim, os bioporos podem diminuir a RP (TARAWALLY et al., 2004), e aumentar a friabilidade (CHAN; HEENAN, 1996) e a condutividade hidráulica saturada (ABREU et al., 2004) do solo. Além disso, os bioporos atenuam os efeitos da compactação sobre o desenvolvimento das plantas pois, após a decomposição das raízes, os mesmos podem ser utilizados pelo sistema radicular de outras culturas para atravessar camadas compactadas (SILVA; ROSOLEM, 2002; REINERT et al., 2008).

A importância da MOS na agregação de solos tropicais é bem

documentada na bibliografia (CASTRO FILHO; MUZZILI; PODANOSCHI, 1998; WOHLBERG et al., 2004; SALTON et al., 2008; SILVA et al., 2011). Neste contexto, o modelo conceitual proposto por Goldchin, Baldock e Oades (1997) demonstra que os processos de formação e estabilização de agregados, especialmente os de maior tamanho (macroagregados), estão relacionados a mucilagens e outras substâncias orgânicas produzidas pelas raízes (exsudatos radiculares) e pelo ataque microbiano à fração particulada da MOS, que é caracterizada por um baixo grau de humificação e pela semelhança química e morfológica ao material do qual é originada (resíduos da parte aérea e das raízes das plantas). De acordo com os mesmos autores, o sistema radicular das plantas e as hifas fúngicas também são importantes para a formação e estabilização dos macroagregados. Diante disso, depreende-se que a macroagregação é um processo transiente, que depende do aporte contínuo de resíduos orgânicos e em quantidades suficientes, bem como da presença de raízes, o que pode ser viabilizado pela adoção de sistemas diversificados de produção agrícola.

O acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo em função do uso de sistemas diversificados de produção pode atenuar as cargas aplicadas pelo tráfego das máquinas agrícolas e pelo pisoteio animal e, assim contribuir para a preservação da qualidade física do solo. Esse efeito pode ser atribuído à elasticidade dos resíduos vegetais e ao aumento da área de contato efetiva entre o solo e os rodados (SOANE, 1990). Neste sentido, Braida et al. (2006) encontraram uma redução de cerca de 31% na energia de compactação na presença de 12 Mg ha⁻¹ de resíduo de milho sobre o solo. Adicionalmente, os resíduos produzidos pelas plantas de cobertura colaboram para a manutenção de maiores conteúdos de água na superfície do solo (ANDRADE, 2008), aliviando, assim, parte dos efeitos produzidos pela compactação, como a menor disponibilidade de água e maior RP. Diversos trabalhos de pesquisa têm comprovado o efeito positivo de espécies vegetais na melhoria da qualidade estrutural de solos cultivados no médio e longo prazos (NEIRO et al., 2003; NICOLOSO et al., 2008; COSTA et al., 2011; MUNKHOLM; HECK; DEE, 2013; BA et al., 2014). Entretanto, poucos estudos têm demonstrando os efeitos do cultivo de espécies vegetais com alto potencial de aporte de fitomassa da parte aérea e raízes na recuperação de solos compactados no curto prazo. Tal fato pode estar relacionado principalmente à baixa sensibilidade dos indicadores físicos tradicionalmente utilizados (densidade do solo, porosidade e

resistência mecânica à penetração) em detectar diretamente, e no curto prazo, alterações no volume, geometria e continuidade dos bioporos (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). Bioindicadores têm sido mais sensíveis que indicadores químicos e físicos para detectar, com mais antecedência, alterações que ocorrem no solo em virtude do seu uso e manejo (LOPES et al., 2013; MENDES; SOUSA; REIS, 2015). Assim, é provável que a utilização de indicadores microbiológicos permita identificar alterações na estrutura do solo proporcionadas por plantas de cobertura mesmo no curto prazo, facilitando a seleção de espécies mais eficientes na melhoria da qualidade física de solo compactados.

O SPD, associado ao uso de espécies vegetais com alta capacidade de produção de fitomassa, estimula a comunidade microbiana do solo (BINI et al., 2014). As espécies vegetais e seu arranjo espaço-temporal nos sistemas de produção influenciam diversos fatores ambientais associados à atividade e diversidade microbiana do solo (DEBIASI et al., 2015). Em primeiro lugar, o sistema de produção utilizado define a quantidade, qualidade e frequência de aporte de fitomassa da parte aérea e raízes (DENARDIN; KOCHHANN, 2006), que se constitui na principal fonte de carbono para a comunidade microbiana (FRANCHINI et al., 2007). Considerando que os microrganismos do solo são frequentemente limitados em função da disponibilidade de C e N, a biomassa e atividade microbianas respondem prontamente à sua adição via fitomassa (HUNGRIA et al., 2009). Neste sentido, Lopes et al. (2013) encontraram correlações positivas e significativas da quantidade de fitomassa aportada e do teor de MOS com diversos indicadores microbiológicos (respiração basal e carbono da biomassa microbiana) e bioquímicos (atividades das enzimas β -glicosidase, arissulfatase, celulase e fosfatase ácida) de qualidade do solo.

Adicionalmente, sistemas de rotação ou sucessão de culturas podem estimular ou suprimir comunidades microbianas em função de alterações na quantidade e qualidade dos compostos orgânicos liberados no solo pelas raízes (KASCHUK; ALBERTON; HUNGRIA, 2010). Uma das funções dos exsudatos radiculares é reduzir o atrito entre os pontos de crescimento das raízes e o solo, reduzindo a resistência mecânica à elongação radicular (BENGOUGH et al., 2011). Assim, a compactação excessiva do solo pode induzir o aumento da produção de exsudatos radiculares e, conseqüentemente, estimular a comunidade microbiana. Neste contexto, Tubeileh et al. (2003) obtiveram um aumento de 191% na

quantidade de C exsudado pelas raízes de milho aos 35 dias após a semeadura, em resposta ao incremento da densidade do solo de 1,30 para 1,45 Mg m⁻³. Em decorrência da maior exsudação de compostos orgânicos pelas raízes, o C da biomassa microbiana cresceu de 66 µg g⁻¹ no tratamento sem compactação (1,30 Mg m⁻³) para 112 µg g⁻¹ no tratamento compactado (1,45 Mg m⁻³).

Além de se constituir em fonte de C, N e outros nutrientes para a microbiota edáfica, a cobertura do solo proporcionada por sistemas diversificados de produção contribui para um maior conteúdo de água (JIN et al., 2011) e menor ocorrência de temperaturas extremas no solo (DERPSCH; SIDIRAS; ROTH, 1986), o que proporciona um habitat favorável aos microrganismos (SILVA et al., 2010). Da mesma forma, a melhoria da estrutura do solo proporcionada pela inclusão de culturas de cobertura nos sistemas de produção favorece a disponibilidade e os fluxos de água e oxigênio no solo (BA et al., 2014), resultando em um ambiente favorável aos microrganismos.

A diversificação de culturas no sistema de produção também aumenta a diversidade da comunidade microbiana (PEREIRA et al., 2007), pois cada espécie vegetal proporciona diferentes fontes de carbono (GARBEVA; van VEEN; van ELSAS, 2004). A monocultura tende a selecionar determinadas espécies de microrganismos em detrimento de outras, o que é indesejável para a sustentabilidade dos sistemas de produção. A falta de diversidade biológica, tanto genética quanto metabólica, pode comprometer a capacidade do solo de reagir a condições adversas, levando ao comprometimento de suas funções (ZILLI et al., 2003). Assim, em solos com elevada diversidade microbiana, se determinada condição adversa prejudicar determinado microrganismo, é provável que a função exercida pelo mesmo seja desempenhada por outro. Isso é fundamental para a manutenção de funções como a ciclagem de nutrientes, a agregação do solo e o controle de patógenos, mesmo sob condições desfavoráveis (NOGUEIRA; HUNGRIA, 2013).

2.5 INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DE QUALIDADE DO SOLO

A qualidade do solo, muitas vezes utilizada como sinônimo de saúde, pode ser definida como a capacidade do mesmo de sustentar a produtividade biológica dentro do ecossistema mantendo a qualidade ambiental e promovendo a

saúde de plantase animal do próprio ser humano (DORAN; PARKIN, 1994; DORAN; SARRANTONIO; LIEBIG, 1996; DORAN; SAFLEY, 1997; SPOSITO; ZABEL, 2003).

Segundo Staben e colaboradores (1997), os processos erosivos, redução dos teores de matéria orgânica, perda de nutrientes, compactação, redução da atividade e biomassa microbiana, redução de atividades enzimáticas e aumento da acidez podem acarretar na degradação da qualidade do solo pelo cultivo.

Para a avaliação da qualidade do solo, faz-se necessário selecionar algumas de suas propriedades que são consideradas como atributos indicadores (DORAN; PARKIN, 1994), as quais devem apresentar sensibilidade às variações do manejo e que sejam correlacionadas com as funções desempenhadas pelo solo. Define-se indicadores como atributos que medem ou refletem o “*status*” ambiental ou a condição de sustentabilidade do ecossistema (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007). O uso de indicadores de qualidade do solo permite monitorar os efeitos de seu uso e manejo e, para tal, esses indicadores devem ter capacidade e sensibilidade para medir e avaliar atributos e processos que interfiram na promoção das formas de vida que dependem do solo (DUMANSKI; PIERI, 2000).

Os microrganismos, segundo Araújo e Monteiro (2007), se enquadram nesses critérios, pois possuem a capacidade de responder rapidamente a mudanças na qualidade do solo, característica que não é observada nos indicadores químicos ou físicos, e, desta forma, podendo ser utilizados como sensíveis bioindicadores de qualidade.

2.5.1 Atividade e Carbono da Biomassa Microbiana

Dentre os indicadores de qualidade microbiológica do solo, a biomassa microbiana é considerada uma das mais importantes (NOGUEIRA; HUNGRIA, 2013), pois representa a parte viva da matéria orgânica do solo (MOS). O carbono da biomassa microbiana (CBM) é formado principalmente por bactérias, fungos, protozoários e algas que participam de importantes funções do solo, como a ciclagem de nutrientes e energia, regulando as transformações da MOS (TURCO; KENNEDY; JAWSON, 1994), e formando um importante estoque de nutrientes que podem ser prontamente disponibilizados às plantas (NOGUEIRA; HUNGRIA, 2013). Além disso, a biomassa microbiana do solo produz enzimas que atuam em vários

processos bioquímicos que estão envolvidos no metabolismo celular, tais como a decomposição dos resíduos orgânicos (ZORNOZA et al., 2015). O estudo da biomassa microbiana do solo e atividades enzimáticas é particularmente importante porque são atributos microbiológicos úteis que podem ser usados para avaliar solos florestais naturais (ZORNOZA et al., 2008), bem como diferentes manejos do solo agrícola (SILVA et al., 2010) e também em pastagens (LOPES et al., 2010; SILVA et al., 2015).

A atividade microbiana pode ser estimada por meio da respiração basal do solo (RB) (NOGUEIRA; HUNGRIA, 2013). Juntamente com o CBM, a RB têm sido frequentemente empregada como indicador de qualidade do solo, tanto de ambientes agrícolas quanto de ambientes naturais (FRANCHINI et al., 2007; HUNGRIA et al., 2009; BABUJIA et al., 2010; MELLONI et al., 2013; LOPES et al., 2013; BINI et al., 2014). A RB é regulada, entre outros fatores, pela quantidade e qualidade (biodisponibilidade) dos compostos orgânicos aportados ao solo via superfície ou rizosfera (HUNGRIA et al., 2009; LOPES et al., 2013; MELLONI et al., 2013). Além disso, a atividade microbiana estimada pela RB é estimulada pela formação de um ambiente favorável aos microrganismos, caracterizado por condições de umidade e temperatura do solo mais estáveis (HUNGRIA et al., 2009; BINI et al., 2014), adequada disponibilidade de oxigênio (WHALLEY; DUMITRU; DEXTER, 1995) e menor revolvimento, que preserva a estrutura do solo e a integridade das hifas fúngicas (BINI et al., 2014).

2.5.2 Quociente Metabólico (qCO_2)

Com base na relação entre RB e CBM, é possível calcular o quociente metabólico (qCO_2), que permite avaliar o estado metabólico dos microrganismos do solo (ANDERSON; DOMSCH, 1993). Segundo esse índice, valores mais elevados representam menor eficiência metabólica, decorrente de uma condição estressante, sendo necessária uma respiração mais intensa para a manutenção da biomassa microbiana (NOGUEIRA; HUNGRIA, 2013). Assim, valores mais baixos de qCO_2 são comumente observados em ambientes mais favoráveis aos microrganismos, como solos sob vegetação nativa (MELLONI et al., 2013) e SPD (FRANCHINI et al., 2007; HUNGRIA et al., 2009; BINI et al., 2014). Conforme Kaschuk, Alberton e Hungria (2010), variações no qCO_2 podem também

refletir alterações na composição da comunidade microbiana, pois fungos apresentam menor requerimento energético para manutenção de sua biomassa do que procariontes.

Valores elevados de $q\text{CO}_2$ indicam maior emissão de CO_2 para a atmosfera por unidade de biomassa microbiana, o que pode representar mineralização de formas estáveis de C do solo, contribuindo para o aquecimento global (NOGUEIRA; HUNGRIA, 2013). Neste sentido, o aumento do estoque de C observado em SPD comparativamente ao preparo convencional tem sido atribuído, em parte, aos menores valores de $q\text{CO}_2$ observados no primeiro (KASCHUK; ALBERTON; HUNGRIA, 2010).

2.5.3 Atividade Enzimática

Além da respiração basal e do carbono da biomassa microbiana, a atividade enzimática pode ser considerada como bom indicador da qualidade do solo (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007; SILVA et al., 2010).

A atividade e a diversidade microbiana do solo têm importantes papéis na sustentabilidade dos sistemas de produção por manterem funções essenciais à saúde do solo, como os ciclos biogeoquímicos (IZQUIERDO et al., 2005). Os microrganismos estão diretamente relacionados à ciclagem de nutrientes, à decomposição de resíduos, às transformações da matéria orgânica do solo, agregação e degradação de compostos xenobióticos (DICK; BREAKWELL; TURCO, 1996).

Acredita-se que as enzimas do solo primariamente derivam de microrganismos, mas também se originam de plantas e animais. A atividade enzimática resulta principalmente da ação de enzimas extracelulares, que podem estar livres na solução do solo, adsorvidas em seus colóides ou imobilizadas em complexos húmicos (BODY; MORTLAND, 1990), e da ação das intracelulares que, após a lise das células, podem atuar também como enzimas extracelulares (WEAVER et al., 1994).

As atividades enzimáticas são consideradas indicadores da atividade microbiana do solo, como fosfatases ácidas e alcalinas, amilases, catalases, desidrogenases, arilsulfatase, celulasas, β -glicosidases, ureases, glutaminases e asparaginases, além de se correlacionarem com a produção de biomassa vegetal.

Além disso, são indicadores de qualidade de solo porque são sensíveis a mudanças no manejo (GIL-SOTRES et al., 2005), como o manejo dos resíduos, compactação (PENGTHAMKEERATI; MOTAVALLI; KREMER, 2011), sistema de cultivo e rotação de culturas (CORDEIRO; CORA; NAHAS, 2012; LISBOA et al., 2012) e também em sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP) (SILVA et al., 2015). Entre as enzimas com maior potencial para uso como bioindicadores de qualidade do solo, destacam-se a β -glicosidase, arilsulfatase, celulase, fosfatase ácida e L-glutaminase (LOPES et al., 2013; BINI et al., 2014; MENDES; SOUSA; REIS JR., 2015).

2.5.4 Diversidade Metabólica de Comunidades Bacterianas

As comunidades do solo são extremamente complexas e diversificadas, com milhões de espécies sendo encontradas dentro de um único ecossistema, variando desde bactérias e fungos microscópicos, até organismos maiores, como minhocas e formigas. Nosso entendimento desta biodiversidade abaixo do solo é limitada diante do que se sabe sobre a diversidade acima dele. Porém, nesta última década houve um número crescente de trabalhos avaliando como as comunidades abaixo do solo são distribuídas no espaço e no tempo, como elas respondem às mudanças globais e quais as consequências das alterações da sua biodiversidade para a dinâmica da comunidade vegetal, interações tróficas acima do solo e nos ciclos biogeoquímicos (BARDGETT; PUTTEN, 2014).

A maioria das pesquisas sobre biodiversidade tem um enfoque nos estudos de diversidade taxonômica (ZAK, et al., 1994), embora cada vez mais atenção esteja sendo dada aos estudos de diversidade genética das comunidades microbiológicas no solo (SILVA, 2013; SOUZA et al., 2012).

Atualmente existem diversas ferramentas metodológicas que permitem avaliar a diversidade metabólica e genética das comunidades microbianas dos solos. A avaliação do perfil metabólico das comunidades por meio do Biolog Ecoplate® é um dos métodos utilizados no estudo da estrutura funcional dos microrganismos, principalmente das bactérias do solo. Este método mede a intensidade de utilização de diferentes fontes de carbono pela microbiota do solo, a partir da redução do tetrazólio utilizado como um indicador, e a utilização de cada substrato orgânico da placa (ANEXO B) é determinada pela absorbância a 590 nm

(ZAK et al., 1994).

Segundo Garland e Mills (1991), é possível classificar e caracterizar comunidades microbianas heterotróficas em diferentes habitats e entre amostras dentro do mesmo habitat com base no perfil de uso de fontes de carbono. Souza et al. (2012) avaliaram a estrutura metabólica e genética de comunidades bacterianas em LATOSSOLO de cerrado sob vegetação nativa ou cultivado em sistema de rotação soja/milho sob SPD e plantio convencional (PC) e observaram alteração do perfil metabólico nos dois sistemas de plantio em comparação ao cerrado nativo.

Neste contexto, a diversidade metabólica é definida pelo número, tipo e taxa de utilização de um conjunto de substratos pela comunidade microbiana (ZAK et al., 1994). Além disso, o perfil metabólico é uma consequência das interações ecológicas entre as diferentes populações e dos efeitos ambientais na expressão genética presente no solo (ZAK et al., 1994). Souza et al. (2012) encontraram correlação significativa entre as matrizes geradas a partir das análises de perfil metabólico (microplacas Biolog Ecoplate®) dos microrganismos e a estrutura genética das comunidades bacterianas com base nos resultados de DGGE no cerrado sob diferentes manejos do solo, concluindo-se que as alterações na composição das comunidades bacterianas são acompanhadas por variações em suas características funcionais.

No entanto, o método Biolog Ecoplate® tem limitações, incluindo sensibilidade à densidade de inóculo, seletividade, pois só é possível detectar atividade de bactérias capazes de crescer em fontes de carbono selecionadas como carboidratos, e também, da incapacidade para determinar a atividade de fungos. Por outro lado, esta metodologia produz um rico conjunto de dados, onde numerosos substratos são hierarquicamente organizados e podem ser monitorados em momentos diferentes durante a incubação, que é ideal para a detecção de diferenças específicas do local na diversidade funcional de microrganismos (ZAK et al., 1994).

Portanto, o perfil metabólico dos microrganismos do solo e a mudança na estrutura da comunidade microbiana influenciados pelo manejo e pela cultura são úteis para a melhor compreensão das funções do solo e no desenvolvimento de agroecossistemas sustentáveis (DAS; CHAKRABARTI, 2013).

3 ARTIGO A: ATRIBUTOS BIOQUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS EM LATOSSOLO SUBMETIDO À COMPACTAÇÃO E CULTURAS DE OUTONO-INVERNO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO.

RESUMO

A compactação altera o armazenamento e os fluxos de ar e água no solo, que pode influenciar a atividade e a diversidade da comunidade microbiana e consequentemente os ciclos biogeoquímicos. Os atributos microbiológicos podem ser indicadores indiretos da qualidade da estrutura do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da compactação e de espécies cultivadas no outono-inverno sobre atributos bioquímicos e microbiológicos do solo, visando a seleção de indicadores sensíveis ao estado de compactação em um LATOSSOLO sob sistema plantio direto (SPD). O experimento foi instalado em fevereiro/2013 em Londrina-PR, com delineamento em blocos ao acaso com três repetições, em parcelas subdivididas (5 m X 15 m), compreendendo quatro culturas de outono-inverno nas parcelas (braquiária *ruzizensis*, aveia preta, milho 2º safra, e trigo), e três estados de compactação (EC) nas subparcelas: EC1- SPD escarificado; EC2- SPD e EC3- SPD compactado com passadas de colhedora. Foram realizadas quatro amostragens de solo: out/2014; fev/2015; jan/2016 e fev/2017. Em cada uma foram determinados atributos químicos e físicos do solo e relacionados com atributos microbiológicos. Foram obtidas amostras de solo nas camadas de 0,0-0,1m de profundidade para a avaliação da respiração basal (RB), carbono da biomassa microbiana (CBM), quociente metabólico (qCO_2), e atividade das enzimas celulase, arilsulfatase, fosfatase ácida e glutaminase. Não houve interação significativa entre os ECs e as culturas de outono-inverno nos atributos químicos e físicos avaliados em todas as épocas de avaliação. A respiração basal (RB) diminuiu com o aumento do EC nas três primeiras amostragens, mas as maiores diferenças ocorreram na primeira amostragem, quando o EC1 e o EC2 apresentaram atividades 68% e 28% maiores que o EC3. Não houve efeito isolado das culturas de outono-inverno sobre o CBM em nenhuma época de avaliação, porém, na primeira e segunda amostragens, o qCO_2 foi maior nas parcelas sob trigo e menor sob milho, enquanto aveia e braquiária promoveram valores intermediários. O efeito dos ECs sobre o CBM na primeira avaliação variou com as culturas de outono-inverno. EC3 apresentou o menor valor e, EC2 e EC1 apresentaram maiores valores de CBM na aveia e braquiária, respectivamente. O CBM não foi significativamente alterado pelos ECs nas parcelas sob milho e, no caso do trigo, o menor valor foi observado para EC1. As enzimas foram mais sensíveis ao EC do solo do que a cobertura de outono-inverno, sendo que os efeitos da compactação foram mais evidentes nas duas primeiras amostragens. A análise canônica discriminante foi mais sensível que o teste de Tukey para discriminar o efeito das culturas de outono-inverno sobre os atributos microbiológicos e bioquímicos do solo. A atividade da glutaminase foi o atributo mais sensível ao EC ou às culturas de outono-inverno. Já a RB e a atividade da celulase foram sensíveis ao EC.

Palavras-chave: Manejo do solo. Carbono da biomassa microbiana. Atividade enzimática do solo.

BIOCHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL ATTRIBUTES IN AN OXISOL SUBMITTED TO COMPACTION AND AUTUMN-WINTER CROPS UNDER NO-TILLAGE.

ABSTRACT

Compaction changes the storage and flow of air and water in the soil, which may affect the activity and the diversity of the microbial community, and consequently, the biogeochemical cycles. By turn, the microbiological attributes can be indirect indicators of the quality of soil structure. The aim of this work was to evaluate the effects of soil compaction and autumn-winter crops on the microbial and enzymatic activities for selection of microbiological indicators sensitive to the compaction status in an Oxisol under no-tillage system (NT). The experiment was carried out in Londrina-PR, in a complete blocks design, in three replications, in a split-plot arrangement, consisting of four autumn-winter crops in the plots (palisade grass – also named brachiaria, black oat, winter maize and wheat), and three compaction status (CS) in the subplot (5 m X 15 m): CS1- NT chiseled, CS2- NT, and CS3- NT compacted with eight traffic of harvester, during four seasons: Oct/2014; Feb/2015; Jan/2016 and Feb/2017. Chemical and physical soil properties were related with microbiological attributes. Soil samples were taken at 0-0.01 m of soil depth for assessment of basal soil respiration (BR), microbial biomass carbon (MBC), metabolic quotient ($q\text{CO}_2$), and activities of cellulase, arylsulfatase, acid phosphatase and glutaminase. There was no significant interaction between CS and autumn-winter crops for any of the chemical and physical attributes at all evaluation times. Basal respiration (BR) decreased with CS increase in the first three samplings. The greatest differences in BR as a function of the CS occurred in the first sampling, when CS1 and CS2 presented activities 68% and 28% higher than CS3. There was no isolated effect of autumn-winter on MBC in any evaluation season, but in the first and second samplings, $q\text{CO}_2$ was higher in the plots under wheat and lower under corn, while oats and brachiaria promoted intermediate values. The effect of CS on MBC in the first evaluation varied with autumn-winter crops. The CS3 soil showed the lowest value of MBC under black oak and brachiaria oats, CS2 and CS1 presented higher values of MBC in the oat and brachiaria plots, respectively. On the other hand, MBC was not significantly changed by CS in plots under maize and, in the case of wheat, the lowest value was observed for CS1. The enzyme activities were more sensitive to the soil CS status than to the autumn-winter crops, especially at the two first samplings. The canonical discriminant analysis was more sensitive to discriminate the effects of autumn-winter crops on the soil microbiological and biochemical attributes, as a result of the amount, quality and time between the residues inputs into the soil and the sampling. The activity of glutaminase was sensitive to both CS and autumn-winter crops, whereas the BR and cellulase activity were more sensitive to the soil compaction status.

Keywords: Soil management. Microbial biomass carbon. Soil enzymatic activity.

3.3 INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto (SPD) tem sido cada vez mais adotado devido aos inúmeros benefícios econômicos, mas principalmente, pelos benefícios agrônômicos, tais como a conservação do solo e água, aumentada biodiversidade do solo (ADL; COLEMAN; READ, 2005), além de melhorias na produtividade das culturas (SILVA et al., 2012).

No entanto, tem sido frequentemente demonstrada a formação de uma camada compactada na subsuperfície do solo sob SPD (FRANCHINI et al., 2009; FRANCHINI et al., 2011). Além de aumentar a resistência do solo à penetração (CAVALIERI et al., 2006; MORAES et al., 2012), o que limita a profundidade e o volume de solo explorado pelas raízes em busca de água e nutrientes (COLLARES et al., 2008; BERGAMIN et al., 2010), a compactação reduz a porosidade total, macroporosidade, capacidade de infiltração de água, aeração e condutividade hidráulica (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996). Essas modificações podem alterar os microhabitats e, conseqüentemente, influenciar na distribuição e atividade dos microrganismos e na diversidade da comunidade microbiana que atua nos ciclos biogeoquímicos do solo (PENGTHAMKEERATI; MOTAVALLI; KREMER, 2011).

O cultivo agrícola pode provocar degradação da qualidade do solo por processos erosivos, redução dos teores de matéria orgânica, perda de nutrientes, compactação, redução da atividade e biomassa microbiana, redução de atividades enzimáticas e aumento da acidez (STABEN et al., 1997). Para a avaliação da qualidade do solo, faz-se necessário selecionar algumas de suas propriedades que são consideradas indicadoras (DORAN; PARKIN, 1994), que medem ou refletem o “*status*” ambiental ou a condição de sustentabilidade do ecossistema (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007). Dessa maneira, o uso de indicadores de qualidade do solo permite monitorar os efeitos de seu uso e manejo e, para tal, esses indicadores devem ter capacidade e sensibilidade para medir e avaliar atributos e processos que interfiram na manutenção das formas de vida que dele dependem (DUMANSKI; PIERI, 2000; NOGUEIRA et al., 2006).

Os microrganismos e os processos por eles intermediados respondem rapidamente a mudanças na forma de uso e manejo do solo, refletindo assim, a sua qualidade. Por sua vez, os indicadores químicos e físicos respondem mais lentamente e, por isso, são considerados menos sensíveis a mudanças

decorrentes do uso e manejo do solo (ARAÚJO e MONTEIRO, 2007). A compactação modifica a estrutura da comunidade microbiana do solo, afetando funções e processos no solo que interferem na dinâmica de carbono e nutrientes naquele ambiente (GRIGAL, 2000). Assim, devido à maior sensibilidade dos atributos microbiológicos, estes poderiam ser empregados como indicadores indiretos de alterações na qualidade física, como o grau de compactação do solo.

Dentre os indicadores de qualidade microbiológica do solo, a biomassa microbiana é considerada uma das mais importantes (NOGUEIRA; HUNGRIA, 2013), pois representa a parte viva da matéria orgânica do solo (MOS). O carbono da biomassa microbiana (CBM) é formado por bactérias, fungos, protozoários e algas, os quais desempenham importantes funções nos ciclos biogeoquímicos, como a ciclagem de nutrientes e energia, regulando as transformações da MOS (TURCO; KENNEDY; JAWSON, 1994), além de constituir um importante estoque de nutrientes em suas células, os quais ficam protegidos de perdas no solo mas, por outro lado, podem ser prontamente disponibilizados às plantas (NOGUEIRA; HUNGRIA, 2013). Além disso, a comunidade microbiana do solo produz enzimas que atuam em vários processos bioquímicos do metabolismo celular, tais como a decomposição de resíduos orgânicos (ZORNOZA et al., 2015). Por terem importância universal nos processos que realizam, os atributos microbiológicos podem ser usados para avaliar desde solos florestais naturais (ZORNOZA et al., 2008) a solos agrícolas sob diferentes manejos (SILVA et al., 2010), assim como as pastagens (LOPES et al., 2010; SILVA et al., 2015).

O objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos da compactação e de culturas de outono-inverno sobre os atributos microbiológicos em um LATOSSOLO Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, e selecionar indicadores microbiológicos sensíveis ao estado de compactação do solo.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Caracterização da Área e do Experimento

O experimento foi realizado na Fazenda Experimental da Embrapa Soja (23°11'S; 51°11'W; 620 m altitude), em Londrina, PR, Brasil. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo subtropical úmido (Cfa), sendo a

temperatura média anual de 21 °C, com temperatura média máxima de 28,5 °C em fevereiro (mês mais quente) e temperatura média mínima de 13,3 °C em julho (mês mais frio). A precipitação média anual é de 1651 mm, com média de 217 mm em janeiro (mês mais chuvoso) e 60 mm em agosto (mês mais seco).

O experimento foi instalado no início de 2013, em uma área sob SPD desde 1991, com rotação soja/milho no verão e trigo/aveia no inverno. O solo é classificado como LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso (784 g kg⁻¹ de argila, 144 g kg⁻¹ de silte e 72 g kg⁻¹ de areia na camada de 0-30 cm de profundidade) (SANTOS et al., 2013). O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com três repetições, em parcelas subdivididas, compreendendo quatro culturas de outono-inverno nas parcelas e três estados de compactação (EC) do solo nas subparcelas (ANEXO A). As culturas de outono-inverno nas parcelas foram: (i) aveia preta (*Avena strigosa* Schreb); (ii) braquiária (*Urochloa ruziziensis*, (R. Germ. & C.M. Evrard) Crins)); (iii) milho safrinha (*Zeamays* L.) e (iv) trigo (*Triticum aestivum* L.). Os ECs do solo nas subparcelas envolveram: (a) EC1- SPD com escarificação do solo (profundidade média de trabalho de 30 cm) somente no início do experimento, em 2013, por meio de um escarificador equipado com rolo destorroador, cinco hastes espaçadas 0,35 cm entre si e ponteiros de 8 cm de largura; (b) EC2- SPD sem tráfego e sem escarificação; (c) EC3- SPD trafegado no momento da instalação do experimento, em 2013, oito vezes com uma colhedora com massa de 10 Mg, equipada com plataforma de colheita de milho (4 linhas) e depósito de grãos vazio, pneus dianteiros Pirelli 18.4-30 R1 e traseiros Pirelli 9.00-16. No tratamento compactado, o tráfego foi realizado com um conteúdo de água na camada de 0-0,2 m equivalente à capacidade de campo do solo (0,32 kg kg⁻¹). Já a escarificação foi realizada na condição de solo friável (conteúdo de água de 0,29 kg kg⁻¹). No verão, em todos os tratamentos, foi implantada a cultura da soja.

Amostras deformadas de solo para análises químicas e microbiológicas foram coletadas, em cada subparcela, em outubro/2014, janeiro/2015, fevereiro/2016 e em fevereiro/2017, na camada de 0-0,1 m de profundidade, num total de 15 sub-amostras para formar uma amostra composta e peneirada (< 2 mm). Parte das amostras foi armazenada a 5°C para as análises microbiológicas, e parte seca ao ar para as análises químicas. Na terra fina seca ao ar (TFSA) foram determinados: pH em 0,01 mol L⁻¹ CaCl₂ (EMBRAPA, 1997), Ca, Mg e Al trocáveis extraídos com KCl 1 mol L⁻¹, analisados por titulometria; P e K

extraídos em Mehlich-I e analisados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente; carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) por combustão via seca usando analisador elementar de C.

Nos mesmos pontos, foram coletadas em outubro/2015 e fevereiro/2017, amostras com estrutura preservada por meio de anéis de aço inox (5 cm x 5 cm, 100 cm³), inseridos verticalmente no centro da camada de 0-0,1 m, para determinar adensidade do solo (DS), macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) pelo método da mesa de tensão, e porosidade total (PT) pela soma da macro e da microporosidade (EMBRAPA, 1997).

3.4.2 Atributos Microbiológicos e Bioquímicos do Solo

Avaliaram-se a atividade microbiana do solo pela respiração basal (RB) (ALEF, 1995), o carbono da biomassa microbiana (CBM) por fumigação-extração (VANCE; BROOKES; JENKINSON, 1987) e o quociente metabólico (qCO_2) pela razão entre a quantidade de CO_2 desprendida da amostra e a biomassa microbiana (ANDERSON; DOMSCH, 1993). O carbono solúvel obtido das amostras não fumigadas para a estimativa do CBM foi considerado o C lábil (CL) (PABST; KÜHNEL; KUZYAKOV, 2013). As atividades de celulase (SCHINNER; VON MERSE, 1990), L-glutaminase (FRANKENBERGER; TABATABAI, 1991), fosfatase ácida (TABATABAI; BREMNER, 1969), e arilsulfatase (SPENCER, 1958) também foram avaliadas.

3.4.3 Análise Estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA, teste F, $p < 0,05$) e comparação entre as médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Todas as análises foram realizadas por meio do programa SISVAR (FERREIRA, 2010).

Entre os atributos microbiológicos e os físico-químicos foram realizadas análises de correlação, a partir do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson (r) nas quatro épocas de avaliação.

Análise canônica discriminante (ACD) foi realizada para determinar quais atributos microbiológicos e bioquímicos mais contribuíram para discriminar as culturas de outono-inverno e os ECs ($P < 0,05$). A ACD foi realizada em separado

para os ECs e as culturas de outono-inverno, em cada época de amostragem por meio do software Statistica, versão 10 (STATSOFT, 2013). O coeficiente canônico padronizado (CCP) representa a contribuição de cada atributo na determinação da função discriminante, ao passo que o coeficiente de correlação canônica (r) mostra a correlação de cada atributo com essa função. No entanto, a taxa de discriminação paralela (TDP) leva em conta esses dois itens, uma vez que o TDP é o produto de ambos ($TDP = CCP \times r$) (BARETTA; MALUCHE-BARETTA; CARDOSO, 2008). Os valores de TDP inferiores a 0,03 são considerados como tendo baixa capacidade de discriminação; entre 0,04 e 0,09 moderado; 0,10-0,20 bons discriminadores; e 0,21-0,41 são considerados como tendo uma boa capacidade discriminante (BARETTA; BROWN; CARDOSO, 2010).

3.5 RESULTADOS

3.5.1 Atributos Químicos do Solo

Não houve interação significativa entre os ECs e as culturas de outono-inverno para nenhum dos atributos químicos avaliados na camada de 0-0,1 m, em todas as épocas de avaliação (Tabela 3.1). Os valores de COT, CL e NT não foram significativamente alterados pelas culturas de outono-inverno, tendo sido influenciados pelos ECs apenas na primeira coleta (outubro/14). De maneira geral, o COT e o NT diminuíram com o aumento do EC, enquanto que o CL foi maior no EC3 comparativamente ao EC1. Adicionalmente, os atributos relacionados à acidez do solo (pH em CaCl_2 , H^+Al , teores de Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} e V%) não variaram significativamente em função dos tratamentos, independentemente da época de avaliação.

De modo geral, os efeitos dos tratamentos sobre os teores de P, K^+ e S-SO_4^- foram pequenos e variaram com a época de amostragem (Tabela 3.1). Para o P, os teores foram significativamente influenciados pelas culturas de outono-inverno na segunda e quarta coletas, com os maiores valores, em geral, ocorrendo para as culturas de grãos (milho e trigo), que receberam fertilizantes fosfatados no outono-inverno. Na amostragem de fevereiro/16, os teores de P em EC2 foram mais altos que em EC1, mas ambos similares a EC3. Os teores de K^+ foram significativamente influenciados pelos ECs apenas na terceira coleta, com maiores

valores em EC1. Quanto aos efeitos das culturas de outono-inverno, novamente as variações mais importantes envolveram as culturas de grãos. Assim, na segunda coleta, os menores teores de K^+ ocorreram nas parcelas sob milho, enquanto que na terceira ocorreram sob trigo. Os teores de $S-SO_4^{2-}$ variaram significativamente com os tratamentos apenas na segunda coleta, sendo maiores nas parcelas sob trigo e milho em relação à braquiária e à aveia que, por sua vez, não diferiram entre si. Adicionalmente, o EC2 apresentou teor de $S-SO_4^{2-}$ menor do que o EC3, sendo ambos similares ao EC1.

Tabela 3.1 - Atributos químicos da camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, sob diferentes estados de compactação e culturas de outono-inverno, em quatro épocas de avaliação.

Atributos ⁽¹⁾	Culturas de outono-inverno				Estados de compactação ⁽²⁾		
	Braquiária	Aveia	Milho	Trigo	EC1	EC2	EC3
-----Outubro/2014-----							
P, mg dm ⁻³	19,11 ^{ns}	22,8	20,37	16,11	21,37 ^{ns}	18,65	18,78
pH, CaCl ₂	5,19 ^{ns}	5,13	5,17	4,84	4,98 ^{ns}	5,08	5,18
Al ³⁺⁽³⁾ , cmol _c dm ⁻³	1,02 ^{ns}	1,02	1,03	1,05	1,03 ^{ns}	1,02	1,03
H+Al, cmol _c dm ⁻³	5,22 ^{ns}	5,35	5,35	4,66	5,42 ^{ns}	4,87	5,14
Ca ²⁺ , cmol _c dm ⁻³	3,23 ^{ns}	3,02	3,24	2,79	2,85 ^{ns}	3,27	3,08
Mg ²⁺ , cmol _c dm ⁻³	1,45 ^{ns}	1,53	1,58	1,58	1,40 ^{ns}	1,66	1,54
K ⁺ , cmol _c dm ⁻³	0,55 ^{ns}	0,63	0,53	0,58	0,54 ^{ns}	0,59	0,58
CTC, cmol _c dm ⁻³	10,5 ^{ns}	10,5	10,7	9,61	10,3 ^{ns}	10,4	10,4
V, %	50,2 ^{ns}	48,9	49,3	51,4	47,1 ^{ns}	52,9	49,8
COT, g kg ⁻¹	21,2 ^{ns}	20,8	20,1	20,2	22,5 a	20,3 ab	19,0 b
CL, g kg ⁻¹	1458 ^{ns}	1490	1589	1516	1557ab	1358 b	1725 a
NT, g kg ⁻¹	2,0 ^{ns}	2,0	2,0	1,9	2,2 a	2,0 ab	1,8 b
-----Janeiro/2015-----							
P, mg dm ⁻³	16 b	24 ab	18 b	30 a	24 ^{ns}	21	21
pH, CaCl ₂	4,7 ^{ns}	4,6	4,6	4,6	4,7 ^{ns}	4,7	4,6
Al ³⁺⁽³⁾ , cmol _c dm ⁻³	1,08 ^{ns}	1,09	1,15	1,13	1,12 ^{ns}	1,09	1,12
H+Al, cmol _c dm ⁻³	5,9 ^{ns}	6,3	6,5	6,5	6,3 ^{ns}	6,2	6,4
Ca ²⁺ , cmol _c dm ⁻³	3,0 ^{ns}	2,9	3,1	2,7	3,0 ^{ns}	3,1	2,8
Mg ²⁺ , cmol _c dm ⁻³	1,4 ^{ns}	1,4	1,3	1,3	1,4 ^{ns}	1,4	1,2

Continuação...

Tabela 3.1 – (continuação)

K ⁺ , cmol _c dm ⁻³	0,65a	0,58 a	0,44 b	0,53 ab	0,60 ^{ns}	0,55	0,49
CTC, cmol _c dm ⁻³	11,0 ^{ns}	11,1	11,3	11,0	11,2 ^{ns}	11,2	10,9
V, %	44 ^{ns}	43	42	41	44 ^{ns}	43	40
S-SO ₄ , mg dm ⁻³	21,4 b	21,3 b	34,6 a	42,9 a	30,2 ab	24,7 b	35,3 a
COT, g kg ⁻¹	20,8 ^{ns}	21,3	20,6	20,7	21,7 ^{ns}	21,1	19,6
CL, g kg ⁻¹	1621 ^{ns}	1551	1636	1645	1608 ^{ns}	1637	1595
NT, g kg ⁻¹	2,3 ^{ns}	2,3	2,3	2,2	2,3 ^{ns}	2,4	2,1
-----Fevereiro/2016-----							
P, mg dm ⁻³	22 ^{ns}	21	23	30	20 b	28 a	24 ab
pH, CaCl ₂	4,7 ^{ns}	4,6	4,5	4,5	4,5 ^{ns}	4,7	4,6
Al ³⁺⁽³⁾ , cmol _c dm ⁻³	1,08 ^{ns}	1,12	1,16	1,13	1,15 ^{ns}	1,11	1,11
H+Al, cmol _c dm ⁻³	6,0 ^{ns}	6,3	6,8	6,6	6,7 ^{ns}	6,3	6,3
Ca ²⁺ , cmol _c dm ⁻³	3,2 ^{ns}	2,8	3,0	2,8	2,8 ^{ns}	3,1	2,9
Mg ²⁺ , cmol _c dm ⁻³	1,5 ^{ns}	1,3	1,2	1,3	1,3 ^{ns}	1,4	1,2
K ⁺ , cmol _c dm ⁻³	0,53 a	0,53 a	0,53 a	0,36 b	0,53 a	0,46 b	0,47 b
CTC, cmol _c dm ⁻³	11,2 ^{ns}	10,9	11,4	11,2	11,3 ^{ns}	11,3	11,0
V, %	46 ^{ns}	42	40	41	41 ^{ns}	45	42
S-SO ₄ , mg dm ⁻³	14,7 ^{ns}	20,4	23,3	19,5	17,8 ^{ns}	17,3	23,2
COT, g kg ⁻¹	20,9 ^{ns}	21,4	20,6	20,5	21,5 ^{ns}	20,7	20,5
CL, g kg ⁻¹	1528 ^{ns}	1499	1450	1509	1517 ^{ns}	1424	1548
NT, g kg ⁻¹	2,08 ^{ns}	2,19	1,99	2,28	2,15 ^{ns}	2,19	2,06
-----Fevereiro/2017-----							
P, mg dm ⁻³	16 b	18 b	21ab	25 a	19 ^{ns}	20	20
pH, CaCl ₂	4,8 ^{ns}	4,6	4,5	4,8	4,6 ^{ns}	4,7	4,7
Al ³⁺⁽³⁾ , cmol _c dm ⁻³	1,05 ^{ns}	1,12	1,14	1,07	1,14 ^{ns}	1,06	1,09
H+Al, cmol _c dm ⁻³	5,79 ^{ns}	6,0	6,8	6,1	6,5 ^{ns}	6,1	6,2
Ca ²⁺ , cmol _c dm ⁻³	3,3 ^{ns}	2,9	3,0	3,4	3,0 ^{ns}	3,4	3,1
Mg ²⁺ , cmol _c dm ⁻³	1,5 ^{ns}	1,2	1,3	1,4	1,3 ^{ns}	1,4	1,4
K ⁺ , cmol _c dm ⁻³	0,48 ^{ns}	0,45	0,35	0,46	0,45 ^{ns}	0,42	0,44
CTC, cmol _c dm ⁻³	11,1 b	11,1 b	11,4 a	11,3 ab	11,2 ^{ns}	11,3	11,2
V, %	48 ^{ns}	41	41	46	42 ^{ns}	46	44
S-SO ₄ , mg dm ⁻³	11,0 ^{ns}	9,4	10,4	8,6	9,7 ^{ns}	9,3	10,6
COT, g kg ⁻¹	22,7 ^{ns}	23,7	24,4	23,3	23,2 ^{ns}	24,0	23,3

Continuação...

Tabela 3.1 – (continuação)

CL, g kg ⁻¹	1616 ^{ns}	1543	1595	1501	1550 ^{ns}	1542	1600
NT, g kg ⁻¹	2,4 ^{ns}	2,5	2,6	2,5	2,5 ^{ns}	2,5	2,4

(¹) CTC = capacidade de troca de cátions a pH 7,0; V, % = Saturação por bases (%); COT = carbono orgânico total; CL = carbono lábil; NT = nitrogênio total;

(²) EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional por tráfego e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg);

(³) Dados transformados para raiz quadrada de x + 1. Médias seguidas de mesma letra entre as culturas de inverno e, entre os estados de compactação, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Ns = não significativo a 5% de probabilidade.

Fonte: o próprio autor.

3.5.2 Atributos Físicos Do Solo

Independentemente da época de amostragem, não houve interação significativa entre os ECs e as culturas de outono-inverno para os atributos físicos DS, Macro, Micro e PT (Tabela 3.2). Da mesma forma, não houve efeito das culturas de outono-inverno, nas duas amostragens. Por outro lado, os ECs influenciaram significativamente todos os atributos físicos avaliados, independentemente da época de amostragem, evidenciando que a escarificação e o tráfego da colhedora promoveram variabilidade na qualidade estrutural do solo.

Tabela 3.2 - Atributos físicos da camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, sob diferentes estados de compactação e culturas de outono-inverno, em duas épocas de avaliação.

Atributos ⁽¹⁾	Culturas de cobertura				Estados de compactação ⁽²⁾		
	Braquiária	Aveia	Milho	Trigo	EC1	EC2	EC3
-----Outubro/2014-----							
DS, Mg m ⁻³	1,21 ^{ns}	1,17	1,18	1,17	1,07 c	1,17 b	1,30 a
Macro, m ³ m ⁻³	0,10 ^{ns}	0,14	0,13	0,14	0,18 a	0,13 b	0,07 c
Micro, m ³ m ⁻³	0,44 ^{ns}	0,41	0,42	0,42	0,39 c	0,42 b	0,44 a
PT, m ³ m ⁻³	0,54 ^{ns}	0,55	0,54	0,56	0,58 a	0,55 b	0,52 c
-----Fevereiro/2017-----							
DS, Mg m ⁻³	1,27 ^{ns}	1,23	1,26	1,25	1,19 c	1,24 b	1,32 a
Macro, m ³ m ⁻³	0,08 ^{ns}	0,10	0,08	0,08	0,11 a	0,08 b	0,05 c
Micro, m ³ m ⁻³	0,45 ^{ns}	0,44	0,45	0,45	0,43 b	0,45 a	0,46 a
PT, m ³ m ⁻³	0,53 ^{ns}	0,54	0,53	0,53	0,54 a	0,53 a	0,51 b

(¹) DS= densidade do solo; Macro= macroporosidade; Micro= microporosidade; PT= porosidade total.

(²)EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional por tráfego e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg). Médias seguidas de

mesma letra entre as culturas de inverno e, entre os estados de compactação, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Ns = não significativo a 5% de probabilidade.
Fonte: o próprio autor.

Os maiores efeitos dos ECs sobre os atributos físicos do solo ocorreram em outubro/2014, quando o aumento do EC aumentou os valores DS e microporosidade e, conseqüentemente, redução na PT e macroporosidade. Os resultados da última coleta foram semelhantes aos da primeira, com valores de DS e macroporosidade aumentando e diminuindo, respectivamente, em resposta ao aumento do EC. A microporosidade foi menor em EC1 comparada a EC2 e EC3 que, por sua vez, não diferiram entre si. Já a PT foi menor no EC3 comparada a EC1 e EC2, que não diferiram entre si.

3.5.3 Atributos Microbiológicos e Bioquímicos

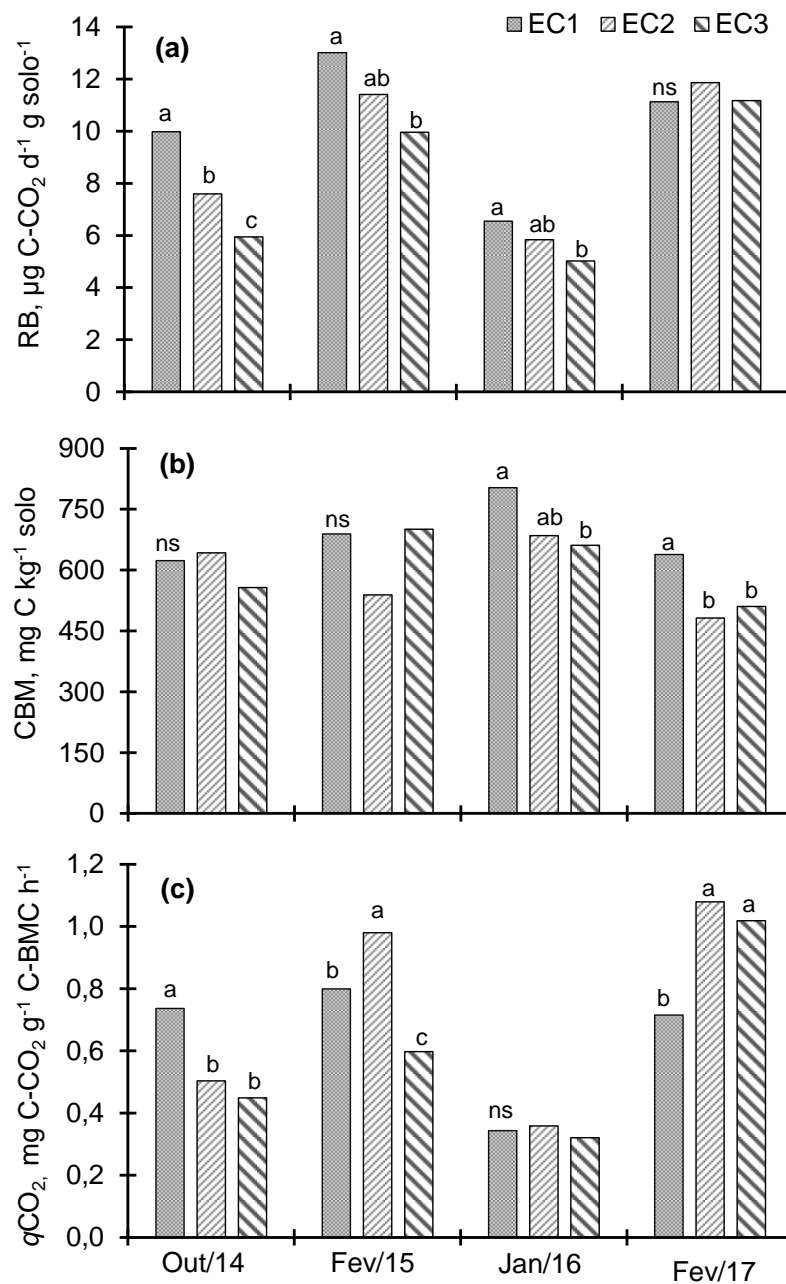
Com exceção do CBM na primeira amostragem, os efeitos da interação entre ECs x culturas de outono-inverno não foram significativos para os atributos microbiológicos e bioquímicos em estudo. Sendo assim, foram considerados apenas os efeitos isolados dos ECs (Figuras 3.1 e 3.3) e das culturas de outono-inverno (Figuras 3.4 e 3.5), enquanto que o desdobramento da interação ECs x culturas para o CBM na primeira amostragem é apresentado na Figura 3.2.

A atividade microbiana baseada na RB diminuiu com o aumento do EC nas três primeiras amostragens, mas o efeito desapareceu na quarta amostragem (Figura 3.1a). As maiores diferenças na RB em função dos ECs ocorreram na primeira amostragem, quando o EC1 e o EC2 apresentaram atividades 68% e 28% maiores que o EC3, respectivamente. Não houve efeito significativo isolado dos ECs sobre o CBM na primeira e segunda amostragem, porém, na terceira avaliação, os valores diminuíram do EC1 para o EC3 (Figura 3.1b). Na quarta coleta, os valores de CBM foram maiores no EC1 em relação ao EC2 e EC3, que não diferiram entre si.

O efeito dos ECs sobre o CBM na primeira avaliação variou com as culturas de outono-inverno (Figura 3.2). O solo do EC3 apresentou o menor valor de CBM sob as culturas de aveia preta e braquiária em 2014. Por sua vez, EC2 e EC1 apresentaram maiores valores de CBM nas parcelas sob aveia e braquiária, respectivamente. Em contrapartida, o CBM não foi significativamente alterado pelos

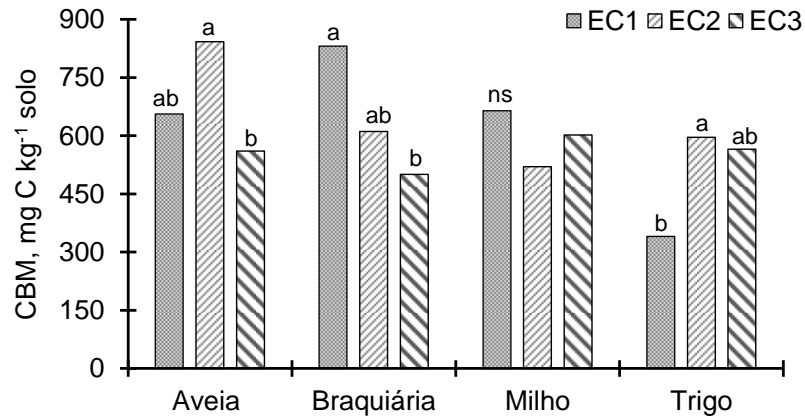
ECs nas parcelas sob milho e, no caso trigo, o menor valor foi observado para o EC1.

Figura 3.1 - Respiração basal (RB) (a), carbono da biomassa microbiana (CBM) (b) e quociente metabólico (qCO_2) (c) de amostras obtidas em quatro épocas, na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, sob diferentes estados de compactação (EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional por tráfego e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg).



Médias seguidas de mesma letra entre os estados de compactação, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. ns = não significativo. Fonte: o próprio autor.

Figura 3.2 - Desdobramento da interação entre os estados de compactação do solo (EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg) e as culturas de outono-inverno para a variável carbono da biomassa microbiana (CBM), determinada em amostras da camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico, obtidas em outubro/2014.



Médias seguidas de mesma letra entre os estados de compactação, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. ns = não significativo. Fonte: o próprio autor.

Houve efeito significativo dos ECs na primeira, segunda e quarta amostragens sobre o $q\text{CO}_2$ (Figura 3.1c), índice que expressa a eficiência metabólica da comunidade microbiana. Nas duas primeiras amostragens, a resposta do $q\text{CO}_2$ aos ECs foi, em linhas gerais, similar à RB, com os maiores valores nos tratamentos com menor compactação superficial (EC2 e, principalmente, EC1). Na terceira amostragem, o $q\text{CO}_2$ não foi significativamente influenciado pelos ECs, tendo em vista que as respostas da RB (Figura 3.1a) e do CBM (Figura 3.1b) aos ECs foram semelhantes. Já na quarta amostragem, o $q\text{CO}_2$ foi significativamente inferior no EC1 em relação ao EC2 e EC3, os quais não diferiram entre si.

Efeito das culturas de outono-inverno na RB foi observado somente na primeira e quarta amostragens (Figura 3.3a). Na coleta realizada após o manejo ou colheita das culturas de outono-inverno (outubro/14), a aveia e a braquiária estimularam a atividade microbiana comparativamente às culturas de milho e trigo, que não diferiram entre si. Entretanto, ao contrário do observado para os ECs, os maiores efeitos das culturas de outono-inverno sobre atividade microbiana ocorreram na última amostragem, durante o ciclo da soja (fevereiro/17), ocasião em que, na média, a RB nas parcelas sob trigo ou braquiária foi cerca de 32% maior que a observada após o cultivo de milho ou aveia.

Não houve efeitos isolados das culturas de outono-inverno sobre o

CBM em nenhuma época de avaliação (Figura 3.3b). No entanto, na primeira e segunda coletas, o qCO_2 foi maior nas parcelas sob trigo e menor nas sob milho, enquanto aveia e braquiária promoveram valores intermediários (Figura 3.3c). Na amostragem de janeiro/16, não houve efeitos das culturas de outono-inverno sobre o qCO_2 . Semelhantemente ao observado para a atividade microbiana (Figura 3.3a), as maiores diferenças de qCO_2 entre as culturas de outono-inverno ocorreram na última coleta, realizada na fase reprodutiva da soja em fevereiro de 2017. Na média das parcelas sob cultivo de trigo e braquiária, o qCO_2 foi de $1,16 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C-BMC h}^{-1}$, cerca de 62% superior à média das parcelas sob aveia e milho, que foi de $0,72 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C-BMC h}^{-1}$.

As atividades das enzimas do solo em função dos ECs e das culturas de outono-inverno são apresentados nas Figuras 3.4 e 3.5, respectivamente. Os maiores efeitos dos ECs ocorreram na primeira e segunda amostragens (Figura 3.4).

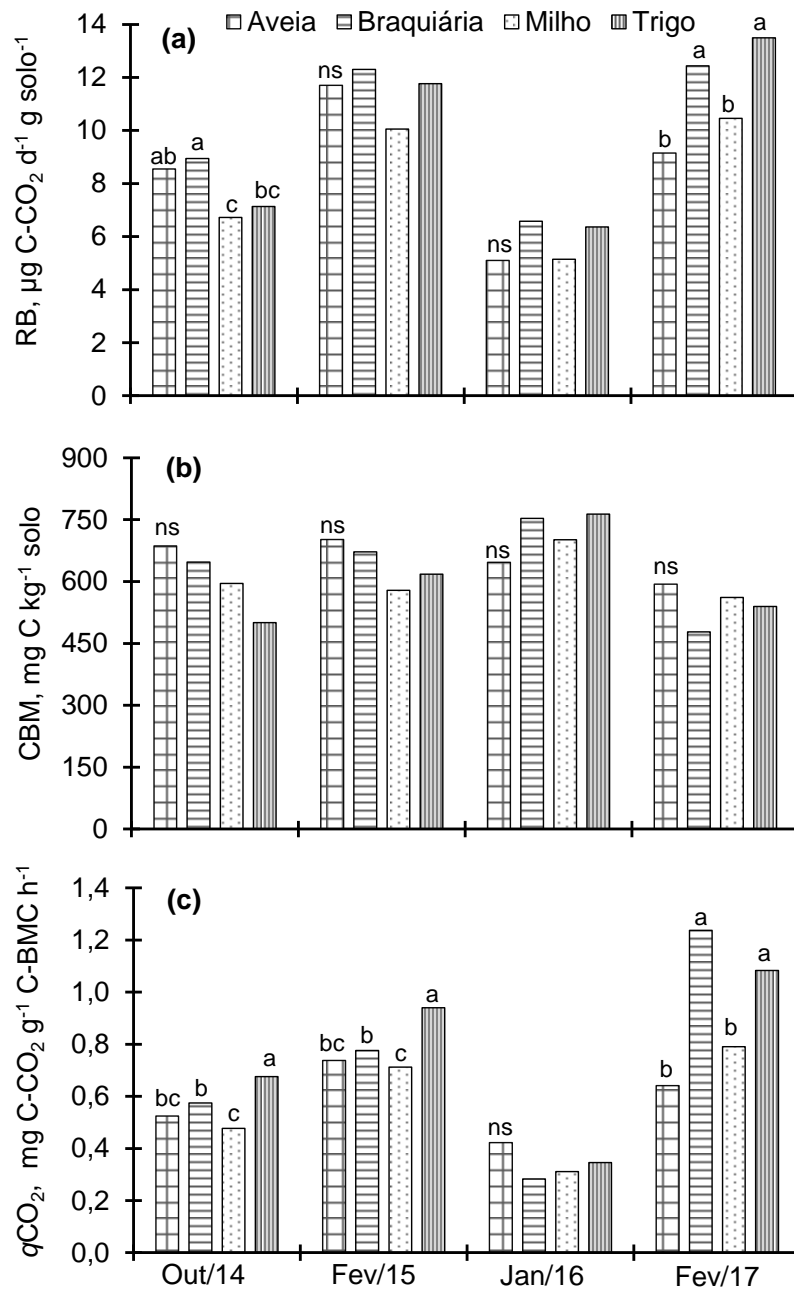
Na primeira amostragem, realizada antes da semeadura da soja na safra 2014/15, as atividades das enzimas fosfatase ácida (Figura 3.4a) e celulase (Figura 3.4b) diminuíram com o aumento do EC. Similarmente, a atividade da glutaminase foi menor no EC3 em relação ao EC1 e ao EC2, que não diferiram entre si (Figura 3.4d). Não houve efeito dos ECs sobre a atividade da arilsulfatase (Figura 3.4c). As atividades das enzimas fosfatase ácida, celulase e glutaminase foram, respectivamente, 26%, 82% e 52% maiores no EC1 em relação ao EC2. Assim, dentre os indicadores bioquímicos responsivos aos ECs na primeira amostragem, a atividade da celulase foi a mais sensível às mudanças na qualidade estrutural do solo.

Na segunda amostragem, realizada durante os estádios reprodutivos da soja na safra 2014/15, os ECs não influenciaram a atividade da fosfatase ácida (Figura 3.4a). Já a atividade da celulase foi maior no EC2 em relação ao EC1 e ao EC3, que por sua vez não diferiram entre si (Figura 3.4b). A arilsulfatase apresentou menor atividade no EC3 e maior no EC2, com EC1 apresentando valores intermediários (Figura 3.4c). No caso da glutaminase, o EC3 diminuiu a atividade em comparação ao EC1 e ao EC2, os quais não diferiram significativamente entre si (Figura 3.4d).

Na terceira amostragem, houve efeito dos ECs apenas sobre a glutaminase, cuja atividade diminuiu com o aumento do EC (Figura 3.4d). Na última

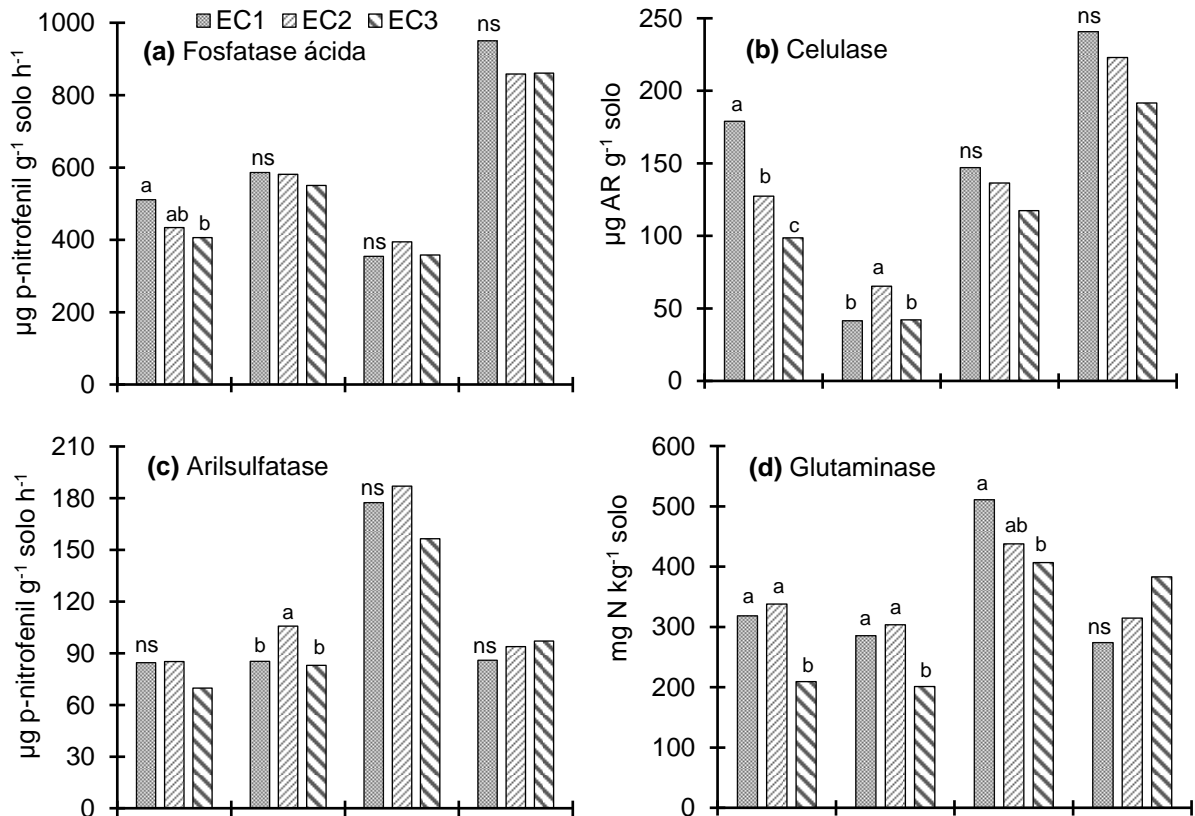
amostragem, nenhum dos indicadores bioquímicos foi influenciado pelos ECs, evidenciando a redução dos efeitos da compactação pelo tráfego da colhedora ou da escarificação do solo sobre suas propriedades bioquímicas com o tempo.

Figura 3.3 - Respiração basal (RB) (a), carbono da biomassa microbiana (CBM) (b) e quociente metabólico (qCO_2) (c) de amostras obtidas em quatro épocas, na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, sob diferentes culturas de outono-inverno.



Médias seguidas de mesma letra entre os estados de compactação, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. ns = não significativo. Fonte: o próprio autor.

Figura 3.4 - Atividades das enzimas fosfatase ácida (a), celulase (b), arilsulfatase (c) e glutaminase (d) em amostras obtidas em quatro épocas, na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, sob diferentes estados de compactação (EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional por tráfego e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg).

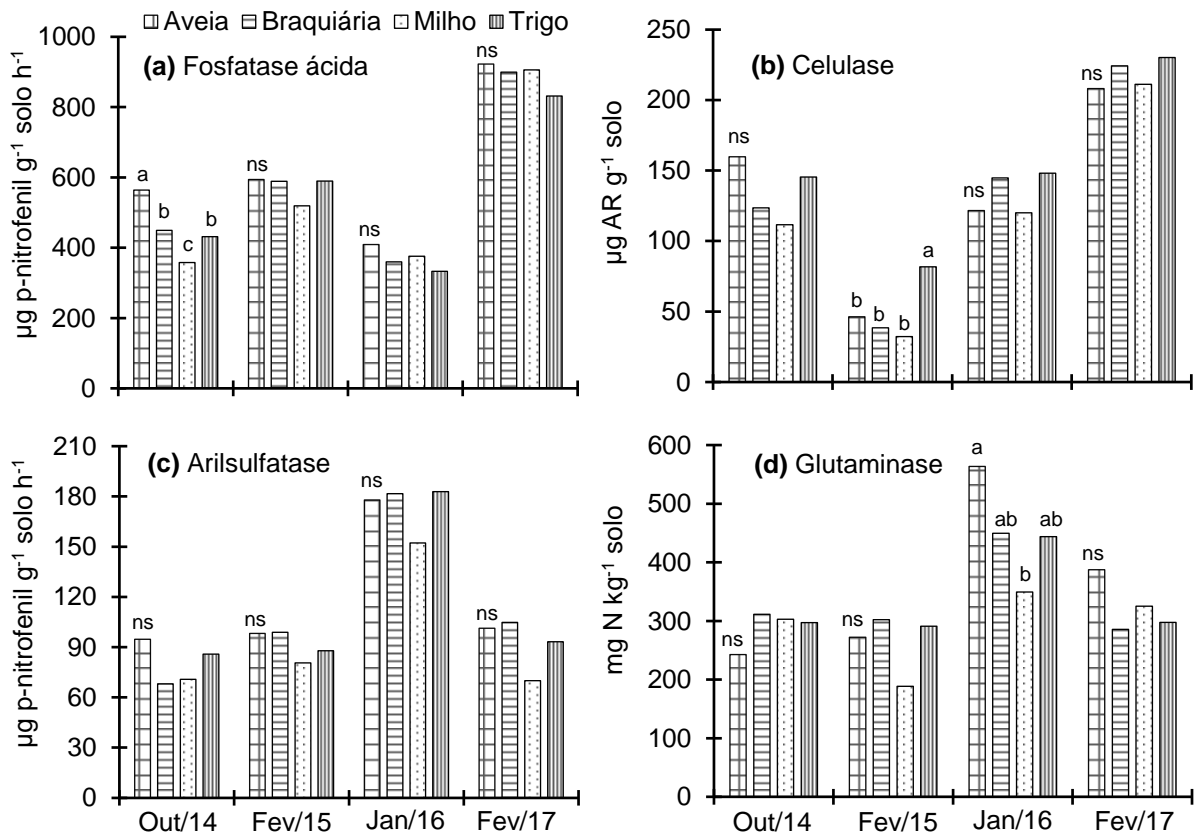


Médias seguidas de mesma letra entre os estados de compactação, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. ns = não significativo. Fonte: o próprio autor.

Em geral, os efeitos das culturas de outono-inverno sobre as enzimas do solo (Figura 3.5) foram menos evidentes que os proporcionados pelos ECs (Figura 3.4). Não houve efeito das culturas de outono-inverno sobre a arilsulfatase (Figura 3.5c), enquanto que a atividade da fosfatase ácida foi influenciada somente na primeira amostragem, na seguinte ordem: milho < braquiária = trigo < aveia (Figura 3.5a). Por sua vez, a atividade da celulase variou significativamente em função das culturas de outono-inverno apenas na segunda amostragem, quando maiores valores foram observados no solo cultivado com trigo (Figura 3.5b). A glutaminase foi influenciada pelas culturas de outono-inverno apenas na 3ª amostragem (Figura 3.5d), quando as maiores atividades ocorreram

nas parcelas sob aveia preta, enquanto o cultivo de milho resultou na menor atividade.

Figura 3.5 - Atividade das enzimas fosfatase ácida (a), celulase (b), arilsulfatase (c) e glutaminase (d) em amostras obtidas em quatro épocas, na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, sob diferentes culturas de outono-inverno.



Médias seguidas de mesma letra entre os estados de compactação, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. ns = não significativo. Fonte: o próprio autor.

3.5.4 Correlação entre Atributos Físico-Químicos e Atributos Microbiológicos e Bioquímicos do Solo

As correlações entre os atributos físico-químicos e os microbiológicos e bioquímicos variaram em função da época de avaliação (Tabelas 3.3 a 3.6). De maneira similar ao observado na comparação das médias entre os ECs (Figuras 3.1 e 3.3), a análise de correlação indicou que os maiores efeitos da qualidade estrutural do solo sobre os atributos microbiológicos ocorreram na primeira (Tabela 3.3) e segunda (Tabela 3.4) amostragens.

Na primeira amostragem, realizada antes da semeadura da soja, a RB e o $q\text{CO}_2$, assim como as atividades da fosfatase ácida, celulase e arilsulfatase, correlacionaram-se negativa e significativamente com a DS e a microporosidade (Tabela 3.3). Houve correlação positiva da RB, $q\text{CO}_2$ e das atividades da celulase e arilsulfatase com a macroporosidade e a PT. Por sua vez, a glutaminase apresentou correlação negativa e significativa apenas com a DS. Em conjunto, estes resultados indicam que o aumento do EC proporciona efeitos negativos sobre a comunidade microbiana do solo. Dentre os atributos microbiológicos e bioquímicos, a RB foi o que apresentou as maiores correlações com os atributos físicos, constituindo-se, portanto, no indicador microbiológico com maior sensibilidade às variações na qualidade estrutural do solo na primeira coleta.

Tabela 3.3 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os atributos microbiológicos e os atributos físico-químicos de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso sob diferentes estados de compactação e coberturas de outono-inverno, em amostragem realizada na camada de 0,0-0,1 m em outubro de 2014.

Atributos ⁽¹⁾	RB	CBM	$q\text{CO}_2$	FOSF	CEL	ArIS	GLU
DS	-0,71**	-0,01	-0,43**	-0,36*	-0,60**	-0,47**	-0,34*
Macro	0,71**	-0,08	0,47**	0,31	0,59**	0,42**	0,23
Micro	-0,65**	0,06	-0,36*	-0,34*	-0,50**	-0,46**	-0,17
PT	0,68**	-0,08	0,51**	0,25	0,61**	0,34*	0,26
COT	0,61**	0,28	0,33*	0,39*	0,55**	0,23	0,15
CL	-0,15	-0,34*	0,04	-0,31	-0,05	-0,15	-0,41**
NT	0,48**	0,39*	0,23	0,32	0,49**	0,27	0,21
P	0,28	0,00	0,23	0,07	0,34*	0,35*	-0,07
pH	-0,18	-0,11	0,10	-0,24	0,10	0,00	-0,33*
Al^{3+}	-0,13	0,08	-0,24	-0,16	-0,29	0,04	0,17
H+Al	0,14	0,15	-0,12	0,18	-0,12	0,06	0,30
Ca^{2+}	-0,25	-0,21	0,06	-0,39*	0,01	-0,05	-0,20
Mg^{2+}	-0,11	-0,07	0,02	-0,24	0,13	0,15	-0,24
K^+	-0,06	0,18	0,21	0,24	0,26	-0,24	-0,12
CTC	-0,22	-0,04	0,02	-0,39*	0,03	0,05	-0,09

Continuação...

Tabela 3.3 – (continuação)

V%	-0,16	-0,14	0,12	-0,24	0,10	-0,04	-0,26
S-SO ₄ ⁻	0,04	0,10	-0,04	0,09	-0,12	0,03	0,11

⁽¹⁾ RB= respiração basal do solo; CBM= carbono da biomassa microbiana; qCO_2 = quociente metabólico; FOSF= atividade da fosfatase; CEL= atividade da celulase; ArilS= atividade da arilsulfatase; GLU= atividade da glutaminase; DS = densidade do solo; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; PT = porosidade total; COT = carbono orgânico total; CL = carbono lábil (solúvel em K₂SO₄ 0,5 M L⁻¹); NT = nitrogênio total do solo; CTC = capacidade de troca de cátions a pH 7,0; V% = saturação por bases (%). * e ** = correlações significativas a 5% e 1% respectivamente.

Fonte: o próprio autor.

Ainda na primeira amostragem, a RB e a celulase correlacionaram-se positiva e significativamente com o COT e o NT (Tabela 3.3), enquanto que o qCO_2 correlacionou-se com o COT e o CBM correlacionou-se com NT. Em contrapartida, a correlação foi negativa entre CL e CBM, e CL e glutaminase. Nenhum atributo microbiológico, de modo geral, apresentou correlação significativa com os outros atributos químicos na primeira coleta.

Na segunda amostragem (janeiro/15), a análise de correlação novamente evidenciou efeitos negativos da compactação e positivos do COT sobre os atributos microbiológicos e bioquímicos (Tabela 3.4). A RB, o qCO_2 e a atividade da glutaminase apresentaram correlação negativa com a DS, e positiva com a macroporosidade e PT. Ao contrário da primeira amostragem, não houve correlação da celulase e da arilsulfatase com atributos físicos do solo. Houve ainda correlações positivas e significativas da RB, CBM, qCO_2 e atividade da fosfatase ácida com o COT, assim como da RB, do qCO_2 e da fosfatase ácida e arilsulfatase com o NT.

A análise de correlação da segunda amostragem mostrou ainda que a acidez do solo teve reflexos negativos sobre a comunidade microbiana (Tabela 3.4), o que não ocorreu na primeira amostragem (Tabela 3.3). Por exemplo, a RB, o qCO_2 e a atividade da arilsulfatase correlacionaram-se positivamente com o pH, os teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ e a V%, e negativamente com a acidez potencial (H+Al). O qCO_2 e a atividade da arilsulfatase tiveram correlação negativa com os teores de Al³⁺. A RB, o qCO_2 e a atividade das enzimas arilsulfatase e glutaminase ainda apresentaram correlações negativas com os teores de S-SO₄⁻ na segunda amostragem.

Na terceira amostragem, os atributos microbiológicos e bioquímicos foram correlacionados apenas com os atributos químicos, já que as variáveis físicas não foram determinadas nesta avaliação (Tabela 3.5). A exemplo das duas amostragens anteriores, a comunidade microbiana foi beneficiada pelo aumento do

COT e NT. Houve correlação positiva e significativa entre COT e as atividades das enzimas fosfatase ácida e arilsulfatase, e entre NT e a RB e a atividade de celulase e arilsulfatase. Similarmente à segunda amostragem, os valores de RB e a atividade da arilsulfatase correlacionaram-se negativamente com os teores de $S-SO_4^-$. Entretanto, ao contrário do observado na segunda amostragem, não houve relação clara entre a acidez do solo e os atributos microbiológicos. Enquanto o CBM foi beneficiado pelo aumento da acidez (correlações negativas com pH, V%, teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , e positivas com H+Al e Al^{3+}), a atividade da arilsulfatase correlacionou-se positivamente com o pH, a V% e os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , e negativamente com H+Al e Al^{3+}). Por sua vez, não houve correlação dos demais indicadores microbiológicos e bioquímicos com os atributos relacionados à acidez do solo.

Tabela 3.4 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os atributos microbiológicos e atributos físico-químicos de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso sob diferentes estados de compactação e coberturas de outono-inverno, em amostragem realizada na camada de 0,0-0,1 m em janeiro de 2015.

Atributos ⁽¹⁾	RB	CBM	qCO_2	FOSF	CEL	AriIS	GLU
DS	-0,48**	-0,10	-0,34*	-0,19	-0,13	-0,24	-0,45**
Macro	0,49**	0,12	0,45**	0,30	0,17	0,21	0,38*
Micro	-0,21	-0,20	-0,18	-0,11	-0,08	-0,08	-0,27
PT	0,53**	0,01	0,49**	0,33*	0,17	0,24	0,35*
COT	0,54**	0,35*	0,46**	0,42**	-0,05	0,31	0,17
CL	-0,11	-0,41**	-0,19	0,12	0,18	-0,38*	-0,08
NT	0,43**	-0,16	0,50**	0,39*	0,09	0,51**	0,19
P	0,20	0,15	-0,08	0,27	0,36*	0,01	0,03
pH	0,44**	-0,11	0,63**	-0,06	-0,09	0,49**	0,26
Al^{3+}	-0,25	0,13	-0,41**	-0,04	-0,10	-0,52**	-0,10
H+Al	-0,36*	0,16	-0,55**	0,13	0,04	-0,46**	-0,22
Ca^{2+}	0,41*	-0,08	0,61**	0,03	-0,06	0,48**	0,17
Mg^{2+}	0,50**	-0,05	0,65**	0,04	-0,14	0,54**	0,36*
K^+	0,42**	0,18	0,32	0,12	0,08	0,15	0,20

Continuação...

Tabela 3.4 – (continuação)

CTC	0,48**	0,19	0,52**	0,34*	-0,11	0,37*	0,19
V%	0,34*	-0,11	0,55**	-0,05	-0,07	0,53**	0,25
S-SO ₄ ⁻	-0,43**	-0,05	-0,51**	-0,21	0,12	-0,50**	-0,34*

⁽¹⁾ RB= respiração basal do solo; CBM= carbono da biomassa microbiana; qCO_2 = quociente metabólico; FOSF= atividade da fosfatase; CEL= atividade da celulase; ArilS= atividade da arilsulfatase; GLU= atividade da glutaminase; DS = densidade do solo; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; PT = porosidade total; COT = carbono orgânico total; CL = carbono lábil (solúvel em K₂SO₄ 0,5 M L⁻¹); NT = nitrogênio total do solo; CTC = capacidade de troca de cátions a pH 7,0; V% = saturação por bases (%). * e ** = correlações significativas a 5% e 1% respectivamente.

Fonte: o próprio autor.

Tabela 3.5 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os atributos microbiológicos e atributos químicos de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso sob diferentes estados de compactação e coberturas de outono-inverno, em amostragem realizada na camada de 0,0-0,1 m em fevereiro de 2016.

Atributos ⁽¹⁾	RB	CBM	qCO_2	FOSF	CEL	ArilS	GLU
COT	0,32	-0,26	-0,02	0,37*	0,21	0,35*	0,20
CL	-0,16	0,31	-0,18	-0,04	-0,11	-0,22	0,13
NT	0,40*	-0,23	0,31	-0,26	0,34*	0,40*	-0,12
P	0,12	-0,12	0,24	-0,01	0,28	0,14	-0,03
pH	0,23	-0,39*	0,09	-0,27	0,01	0,33*	-0,25
Al ³⁺	-0,27	0,35*	-0,08	0,20	-0,04	-0,33*	0,20
H+Al	-0,17	0,36*	-0,03	0,24	0,02	-0,33*	0,17
Ca ²⁺	0,27	-0,34*	0,09	-0,27	0,02	0,33*	-0,41*
Mg ²⁺	0,45**	-0,34*	0,19	-0,22	0,17	0,50**	-0,24
K ⁺	0,14	0,19	0,07	-0,08	0,11	0,21	0,49**
CTC	0,40*	0,13	0,24	-0,02	0,25	0,18	-0,26
V%	0,29	-0,34*	0,10	-0,26	0,04	0,39*	-0,24
S-SO ₄ ⁻	-0,46**	-0,07	-0,21	0,04	-0,22	-0,43**	-0,07

⁽¹⁾ RB= respiração basal do solo; CBM= carbono da biomassa microbiana; qCO_2 = quociente metabólico; FOSF= atividade da fosfatase; CEL= atividade da celulase; ArilS= atividade da arilsulfatase; GLU= atividade da glutaminase; COT = carbono orgânico total; CL = carbono lábil (solúvel em K₂SO₄ 0,5 M L⁻¹); NT = nitrogênio total do solo; CTC = capacidade de troca de cátions a pH 7,0; V% = saturação por bases (%). * e ** = correlações significativas a 5% e 1% respectivamente.

Fonte: o próprio autor.

Na última amostragem, realizada em fevereiro/2017, a análise de correlação indicou pouca relação entre os atributos microbiológicos e bioquímicos do solo e os atributos físico-químicos (Tabela 3.6), o que também ocorreu com resultados da comparação das médias dos ECs (Figuras 3.1 e 3.4). Houve

correlação significativa e negativa apenas entre a DS e a atividade das enzimas fosfatase ácida e celulase. A exemplo do ocorrido na segunda (Tabela 3.4) e terceira (Tabela 3.5) amostragens, o aumento do COT e do NT influenciou positivamente a microbiota do solo, resultando em correlação positiva entre o COT e a atividade das enzimas fosfatase ácida e glutaminase, e entre o NT e os valores de CBM, atividade da fosfatase e da glutaminase.

Similarmente aos resultados da análise de correlação da segunda coleta (Tabela 3.4), o aumento da acidez correlacionou-se negativamente com alguns atributos microbiológicos também na quarta amostragem (Tabela 3.6). Essa afirmação é baseada em correlações negativas da RB, qCO_2 e atividade da arilsulfatase com a acidez potencial (H+Al) e o Al^{3+} , e positivas com o pH, V% e os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} . Houve ainda correlações negativas entre os teores de $S-SO_4$ e a RB e atividade da arilsulfatase, conforme já observado na segunda (Tabela 3.4) e terceira (Tabela 3.5) amostragens.

Tabela 3.6 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os atributos microbiológicos e atributos físico-químicos de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso sob diferentes estados de compactação e coberturas de outono-inverno, em amostragem realizada na camada de 0,0-0,1 m em fevereiro de 2017.

Atributos ⁽¹⁾	RB	CBM	qCO_2	FOSF	CEL	ArilS	GLU
DS	-0,09	-0,19	0,19	-0,35*	-0,33*	0,09	0,18
Macro	-0,17	0,12	-0,35*	0,19	0,23	-0,27	-0,19
Micro	0,13	-0,20	0,37*	-0,23	-0,17	0,23	0,22
PT	-0,16	0,02	-0,25	0,11	0,22	-0,23	-0,12
COT	0,16	0,30	-0,07	0,35*	0,19	0,23	0,45**
CL	-0,11	-0,68**	0,16	-0,31	-0,14	-0,28	-0,31
NT	0,18	0,48**	-0,16	0,47**	0,32	0,30	0,41**
P	0,31	-0,02	0,04	0,02	0,05	-0,27	-0,08
pH	0,39*	-0,04	0,33*	0,03	0,03	0,52**	0,26
Al^{3+}	-0,53**	-0,01	-0,45**	-0,03	0,01	-0,55**	-0,32
H+Al	-0,39**	0,05	-0,35*	0,00	0,01	-0,52**	-0,25
Ca^{2+}	0,45**	-0,03	0,34*	0,00	0,03	0,50**	0,29

Continuação...

Tabela 3.6 – (continuação)

Mg ²⁺	0,56**	0,06	0,45**	0,25	0,28	0,60**	0,46**
K ⁺	-0,05	-0,06	-0,08	-0,21	-0,16	0,12	-0,22
CTC	0,24	0,17	0,05	0,24	0,32	0,15	0,20
V%	0,45**	-0,02	0,36*	0,04	0,04	0,55**	0,30
S-SO ₄ ⁻	-0,37*	-0,21	-0,14	-0,19	-0,17	-0,38*	-0,28

(1) RB= respiração basal do solo; CBM= carbono da biomassa microbiana; qCO_2 = quociente metabólico; FOSF= atividade da fosfatase; CEL= atividade da celulase; ArilS= atividade da arilsulfatase; GLU= atividade da glutaminase; DS = densidade do solo; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; PT = porosidade total; COT = carbono orgânico total; CL = carbono lábil (solúvel em K₂SO₄ 0,5 M L⁻¹); NT = nitrogênio total do solo; CTC = capacidade de troca de cátions a pH 7,0; V% = saturação por bases (%). * e ** = correlações significativas a 5% e 1% respectivamente.

Fonte: o próprio autor.

3.5.5 Análise Canônica Discriminante

Como na ampla maioria dos casos não houve efeito significativo da interação entre os ECs e as culturas de outono-inverno pela ANOVA (Teste F, $p < 0,05$) (item 3.5.3), a análise canônica discriminante (ACD) foi realizada em separado para os ECs e as culturas de outono-inverno, em cada época de amostragem.

O teste de Wilks-Lambda indicou diferenças significativas ($p < 0,01$) entre os ECs no que se refere aos atributos microbiológicos e bioquímicos, em todas as épocas de avaliação. As funções discriminantes ajustadas na ACD explicaram parte significativa da variação dos atributos entre os ECs, tendo em vista que a primeira e a segunda função canônica discriminante (FCD1 e FCD2) apresentaram correlações canônicas (r) de, respectivamente, 0,81 e 0,27 em outubro/14; 0,95 e 0,49 em fevereiro/15; 0,66 e 0,28 em janeiro/16; e 0,64 e 0,28 em fevereiro/17. A ACD permitiu identificar os atributos microbiológicos e bioquímicos que contribuíram significativamente ($p < 0,05$) para diferenciar os ECs nas FCD1 e FCD2 (Tabela 3.7), os quais são considerados mais sensíveis às alterações ocasionadas pelo preparo do solo ou tráfego de máquinas da qualidade estrutural do solo.

Os indicadores com maior capacidade de discriminar os ECs variaram em função da época de amostragem (Tabela 3.7). Na primeira amostragem, a FCD1 explicou mais de 95% da variabilidade dos dados, de forma que a contribuição da FCD2 foi muito pequena (<5%). Os indicadores com maior capacidade de discriminar os ECs na primeira amostragem foram a RB e as enzimas celulase e glutaminase, cujas taxas de discriminação paralela (TDP) na FCD1 foram

0,45, 0,40 e 0,19, respectivamente. Considerando os critérios sugeridos por Baretta, Brown e Cardoso, (2010), esses atributos podem ser considerados, respectivamente, como apresentando ótima, muito boa e boa capacidade discriminante.

Na segunda amostragem, os indicadores mais responsivos aos ECs (66,1% de variação explicada) foram, em ordem decrescente de TDP na FCD1, o qCO_2 , a atividade da arilsulfatase e a RB, com ótima (qCO_2 e arilsulfatase) ou boa (RB) capacidade discriminante. Uma parcela significativa da variabilidade dos dados foi explicada pela FCD2 (33,9%), com a RB apresentando excelente capacidade discriminante (TDP = 1), ao passo que o qCO_2 e a atividade da arilsulfatase, por apresentarem valores de TDP negativos (BARETTA; BROWN; CARDOSO, 2010), não foram efetivos em discriminar os ECs. Na terceira amostragem, a FCD1 explicou mais de 90% da variação dos dados, sendo o CBM, a atividade da glutaminase e da celulase os que contribuíram significativamente para diferenciar os ECs. De acordo com a TDP, os três indicadores apresentaram muito boa capacidade discriminante. A exemplo do observado na primeira e terceira amostragem, a contribuição da FCD2 na explicação da variabilidade dos dados foi muito pequena, sendo a FCD1 responsável por explicar quase 90% da variação total. A atividade da glutaminase e o qCO_2 foram os dois únicos indicadores que contribuíram para diferenciar os ECs. De acordo com os valores de TDP e os critérios de Baretta, Brown e Cardoso (2010), tanto a glutaminase quanto o qCO_2 foram caracterizados como indicadores de muito boa capacidade discriminante.

Comparando-se as médias dos escores canônicos estimados pela FCD1 na primeira avaliação, houve diferenças significativas entre os três ECs (teste LSD, $p < 0,05$), o que não se repetiu para a FCD2 (Tabela 3.8). Do mesmo modo, os escores canônicos estimados pela FCD1 aumentaram e diminuíram linearmente com o aumento da DS e da macroporosidade, respectivamente (Figuras 3.6a e 3.6b).

O coeficiente canônico padronizado (CCP) representa a contribuição de cada atributo na determinação da função discriminante, ao passo que o coeficiente de correlação canônica (r) mostra a correlação de cada atributo com essa função. No entanto, a taxa de discriminação paralela (TDP) leva em conta esses dois itens, uma vez que o TDP é o produto de ambos ($TDP = CCP \times r$) (BARETTA; MALUCHE-BARETTA; CARDOSO, 2008). Os valores de TDP inferiores a 0,03 são considerados como tendo baixa capacidade de discriminação; entre 0,04 e 0,09

moderado; 0,10-0,20 bons discriminadores; e 0,21-0,41 são considerados como tendo uma boa capacidade discriminante (BARETTA; BROWN; CARDOSO, 2010).

Considerando os CCPs da FCD1 na primeira amostragem (Tabela 3.7), o incremento significativo dos valores dos escores canônicos com o aumento do EC na primeira amostragem (Tabela 3.8, Figuras 3.6a e 3.6b) revela que a maior compactação na superfície do solo (0,0-0,1 m) se traduz em menores valores de RB e de atividade das enzimas glutaminase e celulase.

Na segunda avaliação, foram detectadas diferenças significativas (teste LSD, $p < 0,05$) entre os ECs nos escores canônicos estimados pela FCD1 e também pela FCD2 (Tabela 3.8). No âmbito da FCD1, o EC2 resultou em menor escore canônico comparativamente ao EC1 e ao EC3. Interpretando estes resultados com base nos CCPs da FCD1 na segunda amostragem, pode-se inferir que o EC2 se caracterizou por valores mais elevados de qCO_2 e de atividade da arilsulfatase em relação aos EC1 e EC3. Como o EC1 não diferiu do EC3, não houve relação significativa entre os escores canônicos obtidos a partir da FCD1 e os valores de DS e macroporosidade (Figuras 3.6c e 3.6d) na segunda amostragem.

Com relação ao FCD2, o EC3 resultou em maior escore canônico comparativamente ao EC1 e EC2, que não diferiram entre si (Tabela 3.8). Em outras palavras, a FCD2 separou o EC3 do EC1, que na FCD1 constituíram o mesmo grupo. Esse resultado é reforçado pela análise de regressão (Figura 3.7), em que os escores canônicos aumentaram e diminuíram linearmente com o incremento da DS e da macroporosidade, respectivamente. Na FCD2, a RB foi o atributo responsável por discriminar o EC1 do EC3, sendo os maiores valores observados no tratamentos escarificado.

Tabela 3.7 - Coeficientes canônicos padronizados (CCP) das funções canônicas discriminantes (FCD) 1 e 2, coeficientes de correlação canônicos (r) e taxa de discriminação paralela (TDP) para os atributos microbiológicos e bioquímicos de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, que discriminam significativamente (teste F, $p < 0,005$) os diferentes estados de compactação do solo (EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg) em quatro épocas de avaliação.

Atributos microbiológicos ⁽¹⁾	FCD1			FCD2		
	CCP	r	TDP	CCP	r	TDP
----- Out/14 -----						
RB	-0,58	-0,71	0,45	0,26	0,49	0,13
Glutaminase	-0,70	-0,27	0,19	-0,86	-0,96	0,83
Celulase	-0,67	-0,60	0,40	0,09	-0,59	-0,05
% VE ⁽²⁾		95,9			4,1	
----- Fev/15 -----						
qCO ₂	-0,85	-0,51	0,43	0,08	-0,62	-0,05
RB	0,80	0,12	0,10	-1,16	-0,86	1,00
Arilsulfatase	-0,83	-0,50	0,42	0,04	-0,18	-0,007
% VE ⁽²⁾		66,1			33,9	
----- Jan/16 -----						
CBM	0,74	0,54	0,40	0,11	0,22	0,02
Celulase	0,67	0,40	0,27	-0,61	-0,52	0,32
Glutaminase	0,67	0,47	0,31	0,25	-0,009	-0,002
% VE ⁽²⁾		90,5			9,5	
----- Fev/17 -----						
qCO ₂	-0,58	-0,49	0,28	-0,60	-0,68	0,41
Glutaminase	-0,81	-0,38	0,31	0,49	0,42	0,21
% VE ⁽²⁾		89,0			11,0	

⁽¹⁾ RB = respiração basal do solo; qCO₂ = coeficiente metabólico; CBM = carbono da biomassa microbiana.

⁽²⁾ %VE = porcentagem da variabilidade explicada pela respectiva função canônica discriminante.

Fonte: o próprio autor.

Tabela 3.8 - Escores canônicos padronizados estimados pelas funções canônicas discriminantes (FCD) 1 e 2 em diferentes estados de compactação (EC) de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, em quatro épocas de avaliação.

Estado de compactação ⁽¹⁾	Época de avaliação			
	Out/14	Fev/15	Jan/16	Fev/17
----- FCD 1 -----				
EC1	-1,58 c	0,83 a	1,15 a	1,08 a
EC2	-0,07 b	-1,30 b	-0,28 b	-0,26 b
EC3	1,65 a	0,47 a	-0,87 b	-0,82 b
----- FCD 2 -----				
EC1	0,21ns	-0,73 b	0,11ns	0,12ns
EC2	-0,39	-0,15 b	-0,38	0,39
EC3	0,18	0,88 a	0,26	0,27

⁽¹⁾EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg)

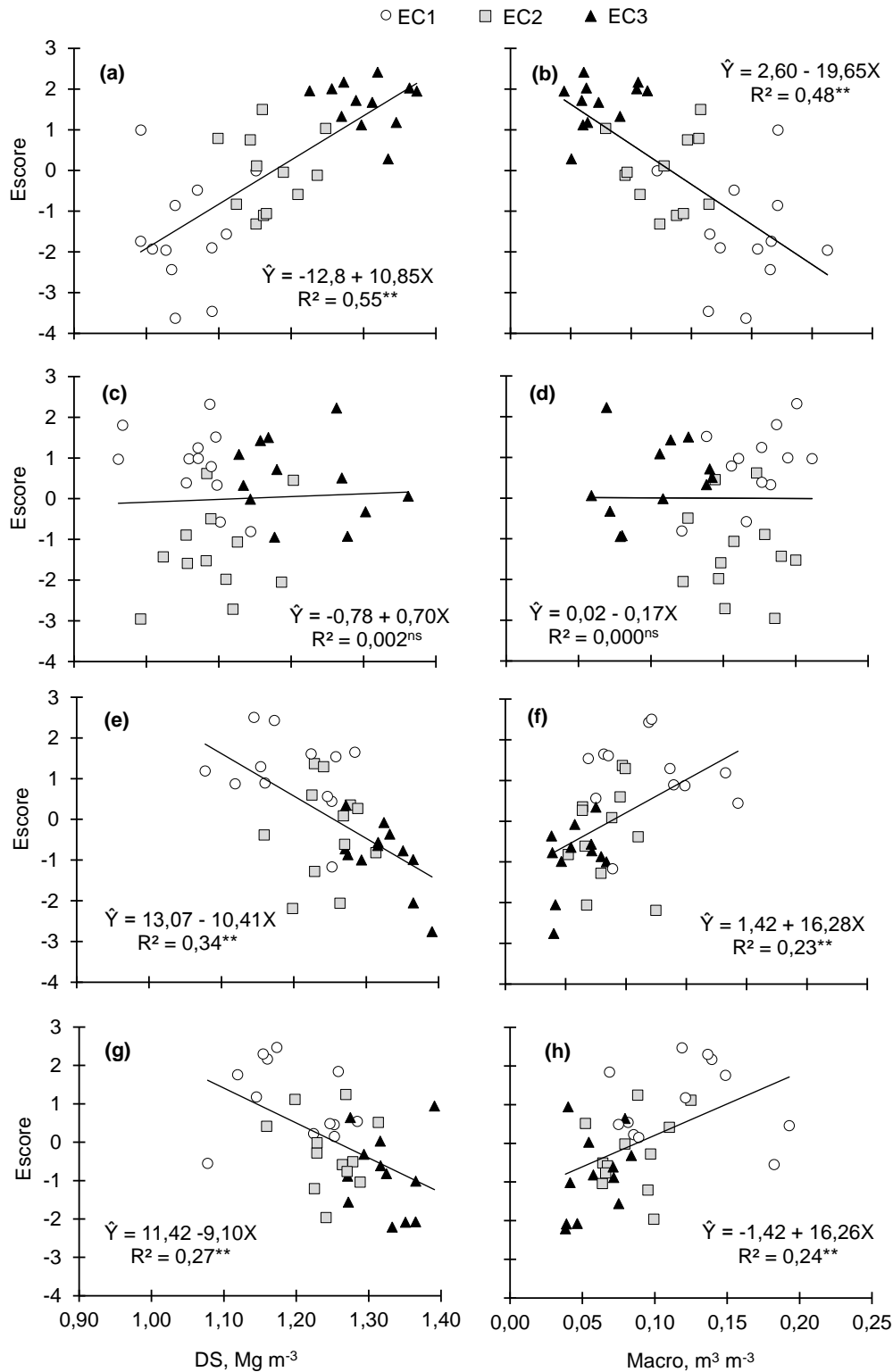
Médias seguidas por letras diferentes nas colunas diferem significativamente pelo teste t LSD ($p < 0,05$).

ns = diferenças não significativas (teste t LSD, $p < 0,05$).

Fonte: o próprio autor.

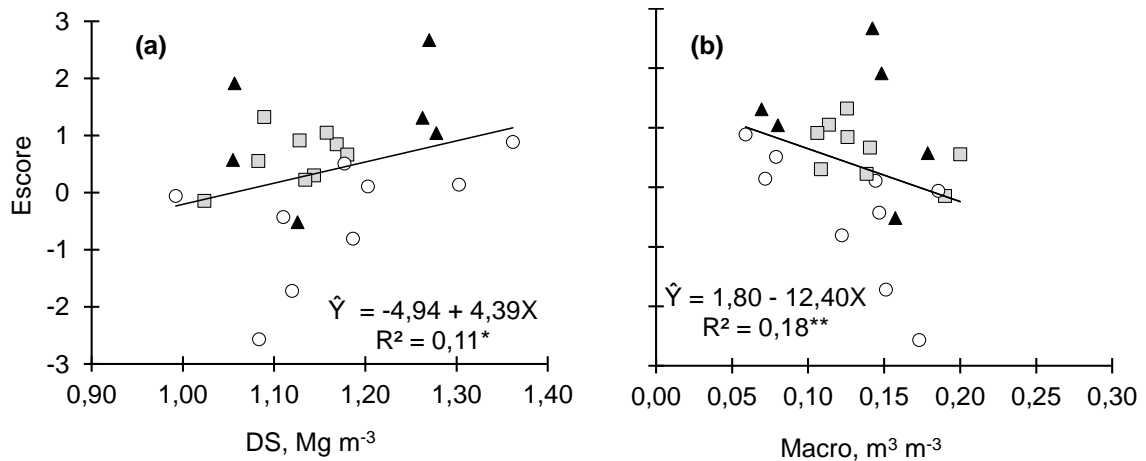
Naterceira e quartaamostragem, os escores canônicos estimados pela FCD1 foram positivos e maiores no EC1 em relação ao EC2 e EC3, que foram negativos e não diferiram entre si (Tabela 3.8). Da mesma forma, os escores canônicos estimados pela FCD1 diminuíram e aumentaram linearmente com o incremento da DS e da macroporosidade, respectivamente, o que ocorreu em ambas amostragens (Figuras 6e-h). Partindo dos valores dos CCPs na terceira amostragem (Tabela 3.7), o EC1 resultou em maior CBM e atividade das enzimas glutaminase e celulase. Já na quarta amostragem, as parcelas com menor EC, especialmente as submetidas à escarificação, obtiveram menores valores de qCO_2 e atividade da glutaminase, evidenciando clara alteração de resposta dos atributos microbiológicos e bioquímicos ao aumento do EC comparativamente às três coletas anteriores. Não houve diferenças significativas entre os ECs para os escores canônicos obtidos da FCD2, em ambas amostragens.

Figura 3.6 - Relação da densidade do solo (DS) (a, c, e, g) e macroporosidade (Macro) (b, d, f, h) de um LATOSSOLO Vermelho distroférrico muito argiloso com os escores das variáveis canônicas estimadas pela função canônica discriminante 1 (FCD1), na 1ª (a,b), 2ª (c, d), 3ª (e, f) e 4ª (g, h) épocas de avaliação. ns = equação não significativa (teste F, $p > 0,05$); ** equação significativa (teste F, $p < 0,01$).



Fonte: o próprio autor.

Figura 3.7 - Relação da densidade do solo (DS) (a) e macroporosidade (Macro) (b) de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso com os escores médios das variáveis canônicas estimadas pela função canônica discriminante 2 (FCD2). ns = equação não significativa (teste F, $p > 0,05$); * = equação significativa (teste F, $p < 0,05$); ** equação significativa (teste F, $p < 0,01$).



Fonte: o próprio autor.

Similarmente ao verificado para os ECs, o teste de Wilks'-Lambda indicou diferenças significativas ($p < 0,01$) entre as espécies vegetais cultivadas no outono-inverno quanto aos atributos microbiológicos e bioquímicos, independentemente da época de amostragem. Da mesma forma, para todas as coletas, apenas as FCD1 e FCD2 apresentaram significância estatística (teste de Wilks-Lambda, $p < 0,05$), demonstrando que a maior parte da variabilidade dos dados foi explicada por estas duas funções. A primeira e a segunda função canônica discriminante (FCD1 e FCD2) apresentaram correlações canônicas (r) de, respectivamente, 0,67 e 0,58 em outubro/14; 0,56 e 0,27, em fevereiro/15; 0,79 e 0,54, em janeiro/16; e 0,77 e 0,61, em fevereiro/17. A exemplo do ocorrido para os ECs, a ACD identificou os atributos microbiológicos e bioquímicos que contribuíram significativamente ($p < 0,05$) para discriminar as culturas de outono-inverno nas FCD1 e FCD2 (Tabela 3.9).

Os indicadores que apresentaram maior capacidade discriminante no que se refere ao impacto da cobertura vegetal no outono-inverno sobre a qualidade microbiológica e bioquímica do solo variaram conforme a época de amostragem (Tabela 3.9). Na primeira avaliação, a FCD1 e FCD2 explicaram, em conjunto, 89,9% da variabilidade dos dados (54,8 e 35,1%, respectivamente). Os

atributos com maior capacidade discriminante na primeira amostragem foram, em ordem decrescente de TDP na FCD1, a fosfatase ácida, a RB e o qCO_2 , classificados como indicadores de valor ótimo, bom e médio, respectivamente (BARETTA;BROWN; CARDOSO, 2010). Conforme a TDP obtida na FCD2, esses atributos foram classificados como sendo indicadores de valor médio (fosfatase ácida e qCO_2) e ótimo (RB).

Na segunda amostragem a FCD1 e a FCD2 explicaram 85,1 e 14,9% da variação total dos dados, respectivamente, sendo as enzimas glutaminase e celulase os indicadores mais eficientes em diferenciar as culturas de cobertura. A celulase apresentou maior TDP na FCD1, enquanto que a glutaminase teve maior poder discriminante na FCD2, sendo, nos dois casos, classificados como indicadores de valor excelente. A FCD1 e a FCD2 responderam por 76,3% e 19,9% da variabilidade dos dados na terceira amostragem, sendo a atividade da glutaminase, o qCO_2 e o CBM os indicadores que contribuíram significativamente para diferenciar as culturas de outono-inverno. Conforme os valores de TDP na FCD1, o valor dos indicadores foi considerado ótimo, muito bom e bom, respectivamente. Já na FCD2, a atividade da glutaminase apresentou valor ótimo, enquanto o qCO_2 e o CBM foram classificados como indicadores de valor médio. Na quarta amostragem, a FCD1 e FCD2 explicaram, em conjunto, 89,6% da variação total dos dados (62,9% e 26,7%, respectivamente). A RB, o qCO_2 e a atividade das enzimas glutaminase e arilsulfatase foram os atributos que contribuíram significativamente para discriminar as culturas de outono-inverno na FCD1 e, de acordo com a TDP, foram classificados como ótimo, muito bom, bom e médio valor discriminante, respectivamente. Na FCD2, as variáveis que colaboraram significativamente para discriminar as culturas de outono-inverno foram a atividade da arilsulfatase, a RB e o qCO_2 , classificadas como indicadores de valor discriminante ótimo, bom e médio. Ainda com relação à FCD2 da quarta amostragem, a TDP da atividade da glutaminase foi negativa, sinalizando que este atributo é um indicador de semelhança e não de diferença entre os grupos avaliados (BARETTA et al., 2006).

Nas três primeiras amostragens (outubro/14, fevereiro/15 e janeiro/16), os escores canônicos estimados pela FCD1 foram significativamente menores (teste LSD, $p < 0,05$), nas parcelas ocupadas por aveia comparativamente às demais culturas (Tabela 3.10), o que, de modo geral, sinalizou maior atividade da comunidade microbiana no solo sob cultivo desta espécie. Na primeira época, o

menor escore canônico indica que o cultivo da aveia proporcionou maior atividade da fosfatase e RB, e menor qCO_2 em relação às demais culturas. Na segunda amostragem e com base na interpretação conjunta dos escores canônicos e dos valores de CCP (Tabela 3.8), o uso da aveia no outono-inverno resultou em maior atividade das enzimas glutaminase e celulase, quando comparada às demais culturas.

Tabela 3.9 - Coeficientes canônicos padronizados (CCP) das funções canônicas discriminantes (FCD) 1 e 2, coeficientes de correlação canônicos (r) e taxa de discriminação paralela (TDP) para os atributos microbiológicos e bioquímicos de um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, que discriminam significativamente (teste F, $p < 0,05$) as diferentes culturas de outono-inverno (aveia preta, braquiária ruziziensis, milho e trigo) em quatro épocas de avaliação.

Atributos microbiológicos ⁽¹⁾	FCD1			FCD 2		
	CCP	r	TDP	CCP	r	TDP
----- Out/14 -----						
Fosfatase	-0,80	-0,87	0,70	0,40	0,27	0,11
qCO_2	0,81	0,09	0,07	0,59	0,24	0,14
RB	-0,42	-0,37	0,16	-1,56	-0,27	0,42
% VE ⁽²⁾		54,8			35,1	
----- Fev/15 -----						
Celulase	-0,94	-0,91	0,86	0,34	0,41	0,14
Glutaminase	-0,42	-0,35	0,15	-0,91	-0,93	0,85
% VE ⁽²⁾		85,1			14,9	
----- Jan/16 -----						
Glutaminase	-0,81	-0,61	0,49	-0,65	-0,66	0,43
CBM	0,62	0,22	0,14	-0,14	-0,26	0,04
qCO_2	-0,61	-0,44	0,27	0,46	0,10	0,05
% VE ⁽²⁾		76,3			19,9	
----- Fev/17 -----						
qCO_2	0,46	0,63	0,29	0,54	0,12	0,06
Arilsulfatase	0,33	0,16	0,05	1,10	0,64	0,70

Continuação...

Tabela 3.9 – (continuação)

Glutaminase	-0,87	-0,22	0,19	-0,48	0,08	-0,04
RB	0,73	0,57	0,42	-1,00	-0,20	0,20
% VE ⁽²⁾	62,9			26,7		

⁽¹⁾ RB = respiração basal do solo; qCO_2 = coeficiente metabólico; CBM = carbono da biomassa microbiana.

⁽²⁾ %VE = porcentagem da variabilidade explicada pela respectiva função canônica discriminante.

Fonte: o próprio autor.

Tabela 3.10 - Variáveis canônicas estimadas pelas funções canônicas discriminantes (FCD) 1 e 2 em diferentes culturas de outono-inverno implantadas sobre LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso, em quatro épocas de avaliação.

Culturas de outono-inverno	Época de avaliação			
	Out/14	Fev/15	Jan/16	Fev/17
----- FCD 1 -----				
Aveia preta	-1,38 b	0,07 b	-2,06 b	-1,40 b
Braquiária	-0,10 a	0,20 a	0,80 a	1,11 a
Milho	0,79 a	0,74 a	0,81 a	-0,81 b
Trigo	0,65 a	1,01 a	0,45 a	1,10 a
----- FCD 2 -----				
Aveia preta	0,33 bc	-0,10ns	0,04 b	0,64 a
Braquiária	-0,93 a	-0,38	-0,70 a	0,81 a
Milho	-0,27 b	0,32	0,96 b	-0,84 b
Trigo	0,88 c	0,15	-0,30 a	-0,61 b

Médias seguidas por letras diferentes nas colunas diferem significativamente pelo teste t LSD ($p < 0,05$).

ns = diferenças não significativas (teste t LSD, $p < 0,05$).

Fonte: o próprio autor.

O menor escore canônico da aveia em relação às demais culturas na terceira coleta demonstra que esta espécie proporcionou valores mais elevados de qCO_2 e atividade da glutaminase, mas inferiores de CBM, em relação às outras culturas. Na última amostragem, o cultivo de braquiária ou de trigo proporcionou, na FCD1, escores canônicos significativamente superiores à aveia e ao milho. Com base nos valores dos CCPs da FCD1 da quarta amostragem, é possível inferir que o uso da braquiária ou trigo no outono-inverno de 2016 resultou em maiores valores de RB, qCO_2 e atividade da arilsulfatase em relação à aveia preta e ao milho que, por sua vez, apresentaram maior atividade da glutaminase.

Na primeira época de amostragem, a FCD2 mostrou diferenças significativas entre a braquiária, o milho e o trigo, que pela FCD1 ficaram no mesmo grupo (Tabela 3.10). A análise conjunta dos CCPs (Tabela 3.8) e dos escores canônicos (Tabela 3.10) mostra que o cultivo do trigo se refletiu nos maiores valores de qCO_2 e nos menores de RB e atividade da fosfatase ácida, sendo o oposto obtido para a braquiária. O milho por sua vez, resultou em escores canônicos menores que o trigo e maiores que a braquiária, indicando comportamento intermediário em relação ao qCO_2 , RB e fosfatase ácida.

Não houve diferenças significativas entre as culturas de outono-inverno para os escores canônicos na segunda coleta, ao passo que, na terceira amostragem, os valores foram positivos e maiores no milho em relação ao trigo e a braquiária, cujos escores foram negativos e não diferiram significativamente. Com base nos CCPs da FCD2 e nas médias dos escores canônicos, o qCO_2 foi maior no milho, o cultivo de braquiária e trigo no outono-inverno proporcionou maior atividade da glutaminase e CBM.

Os escores canônicos da FCD2 na quarta amostragem diferenciaram a aveia do milho e a braquiária do trigo, espécies que compuseram o mesmo grupo considerando a FCD1. Neste sentido, o escore canônico foi maior na aveia e na braquiária em relação ao milho e ao trigo, respectivamente, evidenciando que estas duas espécies proporcionaram, principalmente, maiores atividades da arilsulfatase.

3.6 DISCUSSÃO

A compactação do solo no SPD é apontada como um dos principais fatores limitantes ao aumento da produtividade e da estabilidade de produtividade das culturas componentes dos sistemas de produção de soja no Sul do Brasil (FRANCHINI et al., 2009), estando associada principalmente ao tráfego excessivo de máquinas (DEBIASI et al., 2008) e à baixa diversificação de culturas (NUNES et al., 2014).

Os efeitos negativos da compactação sobre os atributos e processos físicos do solo, bem como sobre o crescimento radicular e o desempenho produtivo das culturas, têm sido amplamente estudados e são relativamente bem conhecidos (CZYZ, 2004; BERGAMIN et al., 2010; SILVA et al., 2009; CHEN et al., 2014;

MORAES et al., 2014; CHEN; WEIL; HILL, 2014; MORAES et al., 2016; WATANABE et al., 2018). Da mesma forma, nas últimas décadas, o conhecimento a respeito do papel desempenhado pela macro e mesofauna e pela comunidade microbiana do solo na melhoria da qualidade estrutural, especialmente no que se refere à formação e estabilização dos agregados, avançou significativamente (DEXTER, 1988; OADES, 1993; GOLDCHIN; BALDOCK; OADES, 1997; DUFRANC et al., 2004; PLAZA et al., 2013; FRANCO et al., 2017; HOK et al., 2018), permitindo indicar práticas de manejo com maior eficiência na prevenção e na mitigação da compactação do solo (CALONEGO et al., 2017).

Porém, os impactos do estado de compactação sobre atributos microbiológicos e bioquímicos do solo são ainda pouco conhecidos, especialmente em regiões tropicais e subtropicais. Além disso, a bibliografia disponível apresenta resultados contraditórios: em alguns trabalhos, são relatados impactos negativos da compactação sobre a microbiota do solo (DICK; MYROLD; KERLE, 1988; JENSEN; MCQUEEN; SHEPHERD, 1996; LI et al., 2003; PENGTHAMKEERATI et al., 2011; VASCONCELLOS et al., 2013); em outros, os efeitos são variáveis (MACDONALD et al., 2009; BEYLICH et al., 2010), ausentes (SHESTAK; BUSSE, 2005) ou, inclusive, positivos (BRELAND; HANSEN, 1996; SOUZA et al., 2010).

A compactação altera a estrutura do solo e o volume, tamanho e geometria dos poros nas camadas (PAGLIAI et al., 2004; GUIMARÃES et al., 2013; MORAES et al., 2014; FRANCO et al., 2017) e nos agregados (SILVA et al., 2014; WATANABE et al., 2018), aumentando a densidade solo, reduzindo a porosidade (em especial, os macroporos) e, também modificando a forma, a tortuosidade e conectividade dos poros. Conseqüentemente, funções como infiltração de água e condutividade hidráulica (MORAES et al., 2016), permeabilidade ao ar (GUIMARÃES et al., 2013; CHEN; WEIL; HILL, 2014; WATANABE et al., 2018), aeração (XU et al., 1992; CZYZ, 2004; ZHANG et al., 2018) são prejudicadas, implicando em alterações nos fluxos e na disponibilidade de água e gases e no potencial redox, o que, por sua vez, influenciam diretamente na fisiologia da comunidade microbiana do solo (RUSER et al., 2006; MACDONALD et al., 2009; ZHANG et al., 2018).

Nesse estudo, o aumento da densidade do solo e a redução do volume de macroporos nos ECs mais intensos provavelmente impactou negativamente os fluxos de gases solo-solo e solo-atmosfera livre, com o conseqüente decréscimo da disponibilidade de O₂, aumento da concentração de

CO₂e redução do potencial redox, alterando a atividade e o metabolismo da microbiota do solo.

Sob tais condições, é provável que a composição da comunidade microbiana nos tratamentos mais compactados tenha sido alterada, com aumento da frequência de microrganismos anaeróbicos facultativos ou obrigatórios em detrimento a dos aeróbicos, que são mais eficientes na utilização de compostos orgânicos do solo, conforme previamente observado por Zhang et al. (2014) e Zhang et al. (2018).

A menor atividade microbiana com o aumento o EC pode ser associada também aos efeitos negativos da degradação da qualidade estrutural do solo sobre o crescimento das plantas, levando à redução no aporte de material orgânico ao solo, principalmente de raízes (CARDOSO et al., 2013) e, em consequência, na disponibilidade de fontes de energia, fator fundamental para o crescimento microbiano (LOPES et al., 2013; HOK et al., 2018; LOPES et al., 2018).

Em avaliações realizadas no mesmo experimento do presente estudo, Moraes (2017) verificaram reduções significativas no aporte de fitomassa da parte aérea e raízes das diferentes espécies vegetais estudadas conforme o aumento do EC. O efeito do menor aporte de fitomassa nos tratamentos mais compactados na redução dos teores de COT e o NT pode ser observado claramente na primeira amostragem, realizada após o manejo/colheita das espécies vegetais de outono-inverno e antes da semeadura da soja. Nesta ocasião, os teores de COT e NT variaram de 22,5 a 19,0 g kg⁻¹, e de 2,2 a 1,8 g kg⁻¹ no EC1 e no EC3, respectivamente (Tabela 3.1).

Os maiores valores de *r* em relação ao COT e ao NT, respectivamente, ocorreram para a RB (0,61 e 0,49) e para a atividade da celulase (0,55 e 0,48), dois indicadores diretamente associados à decomposição microbiana de material vegetal fresco (CARDOSO et al., 2013; BINI et al., 2014; SILVA et al., 2015). Correlações significativas e positivas dos valores de COT e NT com alguns indicadores microbiológicos e bioquímicos do solo se repetiram nas demais avaliações (Tabelas 3.4 a 3.6), porém de forma variável e menos evidente comparativamente a primeira época, o que pode ser explicado principalmente pela baixa variação nos teores de COT e NT e, também, pelo maior tempo entre a avaliação e a adição de fitomassa oriunda do manejo ou colheita das culturas de outono-inverno.

As pressões aplicadas pelo tráfego de máquinas agrícolas aproximam mecanicamente as partículas do solo, induzindo a formação de agregados grandes (“torrões”), com alta coesão e baixa porosidade (VEIGA; REINERT; REICHERT, 2009; CONTE et al, 2011). No interior de agregados grandes, a difusão de O₂ pode ser baixa, gerando um ambiente aneróbico (DIBA; SHIMIZU; HATANO, 2011). Estas condições, que muito provavelmente ocorreram no EC3, especialmente nas duas primeiras avaliações, dificulta o acesso dos microrganismos aos compostos orgânicos no interior dos agregados (BEYLICH et al, 2010), limitando sua atividade e metabolismo.

Em contrapartida, o revolvimento do solo com implementos como o escarificador, utilizado no EC1, pode resultar na ruptura dos agregados, expondo os compostos orgânicos à ação microbiana (TIVET et al., 2013), com o consequente aumento da atividade da biomassa microbiana (FRANCHINI et al., 2007) e estimula a oxidação dos estoques de C mais lábeis do solo. Portanto, alterações na biodisponibilidade (exposição) dos compostos orgânicos do solo, que provavelmente ocorreram neste experimento em função dos impactos dos tratamentos sobre a agregação do solo, também podem ser apontadas como fatores determinantes da resposta significativa dos atributos microbiológicos e bioquímicos ao aumento do EC.

Tanto os ECs quanto as culturas de outono-inverno não influenciaram significativamente os atributos químicos relacionados à acidez do solo (Tabela 3.1). Mesmo assim, as análises de correlação indicaram que, de modo geral, a redução da acidez do solo (maiores valores de pH e menores teores de H⁺Al), assim como o aumento da V% e dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺, aumentaram o qCO₂, a atividade e o metabolismo da comunidade microbiana do solo nassegunda, terceira e quarta amostragens (Tabelas 3.4 e 3.6).

Os indicadores microbiológicos e bioquímicos com maior sensibilidade à acidez do solo e aos teores de bases trocáveis foram, em ordem crescente, a RB, o qCO₂ e a atividade da arilsulfatase. Por outro lado, estes indicadores apresentaram maiores e mais consistentes correlações com os teores de Mg²⁺. A acidez do solo tem sido frequentemente relacionada a alterações na composição (FIERER; JACKSON, 2006) e a reduções na atividade (ANDERSON; DOMSCH, 1993) da comunidade microbiana do solo. Bini et al. (2014) também encontraram forte relação entre o pH e atributos bioquímicos do solo; porém, a acidez influenciou negativamente a atividade da celulase e positivamente a da

glutaminase, enzimas que não se correlacionaram significativamente com o pH no presente trabalho (Tabelas 3.3 a 3.6).

Na bibliografia, informações relacionando decréscimos na acidez do solo ao aumento da atividade da arilsulfatase são escassas. No presente estudo, os teores de S-SO₄ foram negativamente correlacionados ao aumento do pH, da V% e dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺, em todas as amostragens, com valores de r variando de -0,45 a -0,74 (dados não apresentados). Provavelmente, o aumento do pH alterou o balanço de cargas do solo da camada superficial (0,0-0,1 m), com a geração de maior quantidade de cargas negativas e detrimento das positivas, o que favoreceu a lixiviação do S-SO₄⁻.

Sob menores concentrações de S-SO₄⁻, a atividade da arilsulfatase pode ser estimulada, conforme já relatado por Nogueira e Melo (2003). Da mesma forma, a relação negativa entre os teores de S-SO₄⁻ e as variáveis RB (2^a, 3^a e 4^a amostragem) e qCO₂ (2^a amostragem) pode ser apenas reflexo da maior acidez do solo.

A ANOVA, a análise de correlação univariada e a ACD sinalizaram redução dos efeitos dos ECs sobre os atributos microbiológicos e bioquímicos do solo ao longo das avaliações.

As diferenças entre os ECs no que se refere aos atributos físicos do solo também diminuíram ao longo do tempo (Tabela 3.2), porém se mantiveram estatisticamente significativas; portanto, esse fato, de forma isolada, não é suficiente para justificar a diminuição dos impactos da compactação sobre a comunidade microbiana do solo. Uma possível explicação relaciona-se à baixa sensibilidade de atributos físicos baseados em relações massa/volume (DS, PT, macroporosidade e microporosidade) para detectar alterações na qualidade estrutural do solo (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007), especialmente relacionadas ao volume, geometria e continuidade dos bioporos. Embora pequenas essas alterações podem melhorar significativamente o ambiente para os microrganismos em solos excessivamente compactados, pois os bioporos têm alta eficiência no transporte de água e gases, favorecendo a aeração (OADES, 1993; PAGLIAI et al., 2004).

Outro aspecto possivelmente envolvido na redução dos efeitos da compactação sobre a qualidade microbiológica e bioquímica do solo ao longo das amostragens é a elevada capacidade de adaptação da comunidade microbiana a diferentes condições ambientais.

Em trabalho conduzido em diferentes solos na Nova Zelândia, Macdonald et al. (2009) concluíram que os efeitos da compactação sobre a comunidade microbiana variaram em função das populações de microrganismos consideradas. A densidade do solo e a porosidade influenciaram significativamente as populações de bactéria, mas não as de fungos. No caso das bactérias, os efeitos da compactação foram negativos ou positivos, dependendo da população considerada.

Resultados similares foram obtidos por Zhang et al. (2018), que observaram redução da relação bactérias/fungos com o aumento da compactação do solo. Por fim, a época de amostragem em relação ao ciclo das culturas componentes dos diferentes tratamentos pode ter contribuído para a alteração da resposta dos indicadores biológicos à compactação.

À exceção da primeira amostragem, realizada antes da semeadura da soja, as demais foram executadas durante os estádios reprodutivos da soja, época mais indicada para a coleta das amostras de solo em função do melhor estado metabólico dos microrganismos (LOPES et al., 2013). Porém, existem evidências de que as raízes liberam maior quantidade de exsudatos em solos compactados, o que pode estar associado a uma limitação de dreno de foto-assimilados nas raízes devido à limitação no seu crescimento (TUBEILEH et al., 2003). Tal fato pode ter contribuído para aumentar a atividade microbiana nas parcelas com maior compactação, e assim diminuir as diferenças entre os ECs.

O cultivo de espécies vegetais com alto potencial de produção de fitomassa da parte aérea e raízes, como a aveia preta e braquiária, tem sido indicado como uma das práticas mais efetivas para melhorar a qualidade microbiológica e bioquímica do solo (BINI et al., 2014; HOK et al., 2018). Essas culturas proporcionam condições mais estáveis de temperatura e umidade no solo em função da cobertura viva ou morta, e maiores adições de material orgânico (fitomassa da parte aérea, raízes e exsudatos radiculares), o que pode estimular a biomassa, diversidade e atividade microbianas (BALOTA et al., 2003; CARDOSO et al., 2013; BINI et al., 2014).

Além disso, o cultivo de plantas de cobertura do solo pode contribuir para a melhoria da qualidade física do solo no médio e longo prazos (MUNKHOLM et al., 2013; BA et al., 2014; ABDOLLAHI et al., 2015; CALONEGO; ROSOLEM, 2017) e, assim, também favorecer a comunidade microbiana.

Neste trabalho, os efeitos das culturas de outono-inverno sobre os indicadores microbiológicos (Figura 3.3) e bioquímicos (Figura 3.5) foram pequenos e pontuais, quando analisados por meio da ANOVA e comparação múltipla de médias. Estes resultados se assemelham a outras pesquisas realizadas em condições similares, em que os efeitos das culturas sobre os atributos microbiológicos, inferidos por meio de análises estatísticas univariadas, foram pequenos ou mesmo não detectados (FRANCHINI et al., 2007; HUNGRIA et al., 2009; SILVA et al., 2010; SILVA et al., 2014).

No presente estudo, os efeitos mais consistentes foram observados para o qCO_2 , com diferenças entre as culturas de outono-inverno em todas as épocas de amostragem, à exceção da terceira (Figura 3.3a). Em geral, os maiores valores de qCO_2 foram observados nas parcelas sob cultivo de trigo e, na última coleta, também nas ocupadas por braquiária. Nas duas primeiras amostragens, o maior qCO_2 nas parcelas sob cultivo de trigo foi acompanhado de valores iguais ou menores de RB em relação às demais culturas. Tal constatação, em conjunto com maior relação C/N e recalcitrância dos restos culturais do trigo e, no caso da primeira amostragem, com o pequeno intervalo entre a colheita e amostragem, sinaliza que o maior qCO_2 neste tratamento está provavelmente associado a um gasto energético mais elevado para manutenção da microbiota (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

Entretanto, na quarta amostragem, o maior qCO_2 nos tratamentos envolvendo trigo e braquiária resultou principalmente de um aumento acentuado na RB. Neste caso, o qCO_2 deve ser interpretado com cuidado, pois valores altos podem estar associados à liberação de compostos orgânicos de maior labilidade que estimulam de maneira rápida a atividade microbiana (DINESH et al., 2003), o que pode ter ocorrido pelo fato de a avaliação ter sido realizada no final de fevereiro/2017, quase seis meses após a colheita do trigo.

Resultados mais consistentes no que se refere aos efeitos das culturas de outono-inverno sobre atributos microbiológicos e bioquímicos do solo foram obtidos por meio da ACD (Tabela 3.10), demonstrando a eficiência dessa ferramenta em detectar diferenças entre tratamentos, conforme ressaltado por Baretta et al., 2006, Baretta, Brown e Cardoso (2010) e Bini et al. (2014).

A FCD1, que explicou a maior variabilidade dos dados, indicou diferenças significativas entre as culturas de outono-inverno, independentemente da

época de avaliação, o que foi confirmado pelo teste LSD ($p < 0,05$) aplicado aos escores canônicos. Nas três primeiras coletas, as parcelas ocupadas por aveia diferiram significativamente das demais culturas de outono-inverno.

Embora os indicadores que mais contribuíram para discriminar as espécies de outono-inverno tenham variado entre as três primeiras épocas de avaliação, o cultivo de aveia favoreceu a comunidade microbiana do solo em relação às demais culturas, principalmente no que se refere ao aumento da atividade da glutaminase. Como a L-glutaminase catalisa a hidrólise da L-glutamina em amônia e ácido L-glutâmico (FRANKENBERGER; TABATABAI, 1991), é provável que a fitomassa da aveia apresente maior concentração deste aminoácido em relação às demais espécies.

Da mesma forma, o cultivo de aveia pode ter proporcionado um ambiente mais favorável para o crescimento microbiano, em termos de biodisponibilidade de fontes de energia e melhoria dos fluxos de gases e água. Similarmente, Biniet al. (2014), em experimento conduzido sobre LATOSSOLO muito argiloso, em Londrina/PR, verificaram que o cultivo de aveia preta aumentou em aproximadamente 24% a atividade da glutaminase em relação às parcelas sob pousio no outono-inverno.

Na quarta amostragem e considerando a FCD1, a braquiária e o trigo apresentaram escores canônicos significativamente superiores à aveia e ao milho e, dessa forma, maiores valores de RB, qCO_2 e atividade da arilsulfatase. É importante lembrar que a quarta amostragem foi realizada no final de fevereiro/2017, ou seja, com um intervalo maior após o manejo/colheita das culturas de outono/inverno em relação às demais coletas.

Em comparação à aveia e ao milho, a braquiária e o trigo se caracterizam por uma fitomassa com menor labilidade, devido à maior relação C/N e maior concentração de substâncias orgânicas mais complexas e recalcitrantes, como a lignina, o que implica, em um primeiro momento, em menor liberação de C- CO_2 (CARDOSO et al., 2013). Da mesma forma, a braquiária produziu maior quantidade de fitomassa da parte aérea e raízes em relação ao milho (dados não apresentados), enquanto que o trigo permaneceu vegetando por mais tempo, sendo colhido apenas no final de setembro, enquanto o milho foi colhido em final de julho.

Estes fatores permitem inferir que, no momento da amostragem em fevereiro/2017, havia maior presença de material vegetal nas parcelas sob cultivo de

trigo e braquiária, o que se traduziu em maior disponibilidade de fontes de carbono e, conseqüentemente, melhores condições para o crescimento microbiano. Ainda com relação à quarta amostragem, o milho e, mais uma vez, a aveia preta, conferiram ao solo maior atividade da glutaminase, corroborando novamente os resultados de Biniet al. (2014).

As culturas de outono-inverno também diferiram significativamente entre si com relação a FCD2 em todas as amostragens, com exceção da segunda amostragem. A FCD2 explicou boa parte da variabilidade total dos dados na primeira amostragem, quando o maior escore ocorreu para o trigo e, similarmente ao observado na ANOVA, foi associado principalmente a valores mais elevados de ρCO_2 , evidenciando mais uma vez, maior estresse metabólico nas parcelas ocupadas por esta cultura.

Na terceira amostragem, em adição às diferenças já explicadas pela FCD1, a FCD2 separou o milho do trigo e da braquiária, com estas duas espécies promovendo maiores valores de CBM e, principalmente, de atividade da glutaminase. Estes dados indicam que, na terceira amostragem, o milho foi a cultura que resultou na menor qualidade microbiológica e bioquímica do solo, o que provavelmente está associada à menor produção de fitomassa da parte aérea e raízes e, principalmente, ao maior intervalo entre a colheita do milho e a amostragem do solo.

Já na quarta amostragem, a exemplo do observado na primeira e terceira amostragens, a FCD2 separou as culturas que haviam ficado no mesmo grupo segundo a discriminação obtida por meio da FCD1, de modo que a aveia e a braquiária diferiram do milho e do trigo, por resultarem em maior atividade da arilsulfatase.

De modo geral, os efeitos das culturas de outono-inverno sobre os atributos microbiológicos e bioquímicos do solo dependeram: a) da quantidade da fitomassa adicionada; b) da qualidade dos resíduos vegetais produzidos, principalmente no que se refere à relação C/N; e c) do intervalo decorrido entre a colheita ou manejo da cultura e a coleta das amostras. Estas inferências corroboram LOPES et al. (2018) que, analisando diversos trabalhos, concluíram que as flutuações sazonais nos atributos microbiológicos estão diretamente ligadas à disponibilidade, quantidade e qualidade dos substratos ao longo do ano, sendo essas relações variáveis com o ecossistema estudado, os parâmetros avaliados e os

atributos físicos e químicos do solo.

Similarmente, os resultados obtidos por SILVA et al. (2015) demonstram que os efeitos de diferentes intensidades de pastejo sobre os atributos microbiológicos variaram com a época de amostragem, em função da quantidade e qualidade dos materiais orgânicos aportados no sistema (fitomassa e excretas animais). Segundo os autores, a atividade da celulase apresentou maior sensibilidade a diferentes intensidades de pastejo comparativamente à arilsulfatase, fosfatase ácida e β -glucosidase, considerando a avaliação antes da semeadura da soja. Após a colheita da soja, a arilsulfatase foi a enzima com maior sensibilidade aos tratamentos.

A ACD permitiu identificar os indicadores de qualidade microbiológica e bioquímica do solo mais sensíveis às alterações resultantes dos diferentes ECs e das culturas de outono-inverno. Entretanto, os indicadores com maior contribuição na discriminação entre os tratamentos variaram com a época de avaliação, o que também foi observado por Baretta; Brown e Cardoso (2010) e Cervantes (2017). Adicionalmente nenhum atributo microbiológico ou bioquímico apresentou capacidade em discriminar significativamente os ECs e as culturas de outono-inverno em todas as épocas de avaliação. Isso reforça a necessidade de um conjunto mínimo de indicadores para avaliação da qualidade do solo.

Neste contexto, os indicadores microbiológicos e bioquímicos de qualidade do solo variam amplamente em resposta ao clima (umidade e temperatura) e aos atributos químicos e físicos do solo (CARDOSO et al., 2013; LOPES et al., 2018). Assim, a avaliação dos impactos do manejo sobre a qualidade microbiológica e bioquímica do solo exige um conjunto mínimo de indicadores capazes de responder à complexidade do sistema solo (CARDOSO et al., 2013).

Apesar das variações temporais na sensibilidade dos indicadores de qualidade biológica do solo avaliados neste trabalho, de modo geral, a atividade da glutaminase foi o indicador que mais frequentemente contribuiu na discriminação dos ECs e das culturas de outono-inverno. Biniet al. (2014) e Kuwano et al. (2014) citam a atividade da glutaminase como indicador sensível às alterações ocasionadas pelo manejo. Por outro lado, a RB e atividade da celulase apresentaram potencial como indicadores dos impactos da compactação sobre a qualidade do solo.

No caso específico da celulase, os resultados obtidos neste estudo apontam grande potencial de uso como indicadora do EC, desde que seja

quantificada na condição onde sua atuação seja mais requerida, ou seja, logo após a adição de materiais ricos em celulose, como ocorreu na primeira época de avaliação.

3.7 CONCLUSÕES

Dentre o conjunto de indicadores avaliados, as enzimas foram muito mais influenciadas pelo estado de compactação do solo do que a cobertura de outono-inverno, sendo que os efeitos da compactação foram mais evidentes nas duas primeiras amostragens.

No que se refere à cobertura de outono-inverno, a análise canônica discriminante foi mais sensível para discriminar seu efeito sobre os atributos microbiológicos e bioquímicos. Nesse caso, o efeito das culturas foi atribuível à qualidade e a quantidade dos resíduos depositados sobre o solo, bem como ao tempo entre o aporte destes resíduos e a amostragem do solo.

A atividade da glutaminase foi a que mais frequentemente diferiu ou contribuiu para discriminar os estados de compactação ou as culturas de outono-inverno. Por sua vez, a respiração basal e a atividade da celulase foram sensíveis para discriminar o estado de compactação do solo.

4 ARTIGO B: ALTERAÇÃO DA DIVERSIDADE METABÓLICA INDUZIDA PELA COMPACTAÇÃO E PLANTAS DE COBERTURA EM UM SOLO OXÍDICO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO.

RESUMO

O sistema plantio direto (SPD) é o manejo do solo mais importante para a sustentabilidade dos agroecossistemas brasileiros. No entanto, sistemas de produção com baixa diversidade de espécies vegetais e sob tráfego intenso de máquinas agrícolas podem resultar na formação de camadas compactadas limitantes ao funcionamento do solo e ao crescimento das plantas. A compactação altera o armazenamento e os fluxos de ar e água no solo, o que influencia a atividade e a diversidade metabólica da comunidade microbiana, que por sua vez também são alteradas pelas espécies vegetais cultivadas. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da compactação e de diferentes culturas de outono-inverno sobre a diversidade metabólica da comunidade microbiana do solo visando identificar indicadores biológicos sensíveis ao estado de compactação e cobertura vegetal em um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso manejado em SPD. O experimento foi instalado na fazenda experimental da Embrapa-Soja em Londrina-PR, em fevereiro de 2013. O delineamento foi em blocos ao acaso com três repetições e parcelas subdivididas, compreendendo o cultivo de quatro culturas de outono-inverno nas parcelas (braquiária – *Urochloaruziziensis*, aveia preta – *Avena strigosa*, milho de segunda safra – *Zeamays* e trigo – *Triticumaestivum*), e três estados de compactação (EC) nas subparcelas: EC1 - SPD escarificado em fevereiro/2013; EC2 - SPD sem escarificação ou compactação adicional por tráfego; e EC3 - SPD compactado com oito passadas de colhedora em fevereiro/2013. Em fevereiro de 2017, foram obtidas amostras de solo na camada 0,0-0,1 m de profundidade para a avaliação da diversidade metabólica por Biolog EcoPlate®, contendo 31 fontes de carbono, para a obtenção do índice de diversidade de Shannon (H') e a diversidade de substratos (S). Foram determinados ainda atributos químicos e físicos do solo, como densidade e porosidade. O efeito da compactação sobre a diversidade metabólica variou em função das culturas de outono-inverno. Nas parcelas cultivadas com aveia preta e milho, o EC1 resultou em menor H' e S em relação ao EC2 e EC3, que não diferiram entre si. Não houve efeito significativo dos ECs sobre variáveis H' e S quando o solo foi cultivado com trigo, exceto para S após 216 h de incubação. O EC1 proporcionou maior H' e S em relação ao EC2 e ao EC3 sob braquiária. O potencial e a taxa de consumo dos substratos orgânicos foram menores no SPD escarificado comparativamente a EC2 e EC3 sob o cultivo de aveia preta ou milho. Nas parcelas sob braquiária, o EC1 apresentou maior potencial e taxa de consumo das fontes de C em relação ao EC2 e EC3, enquanto que a cinética de consumo de substrato não foi influenciada pelos ECs sob trigo. A comunidade bacteriana foi negativamente influenciada pela escarificação (EC1), sob aveia e milho, com menor produção de biomassa e/ou com maior facilidade de decomposição pela biota do solo. O perfil metabólico da comunidade microbiana foi sensível aos ECs às culturas de outono-inverno, apresentando potencial para uso como indicador de qualidade do solo.

Palavras-chave: Perfil metabólico. Biolog Ecoplate®. Estrutura do solo. Rotação de culturas. Recuperação física do solo.

CHANGES IN THE METABOLIC DIVERSITY INDUCED BY COMPACTION AND COVER CROPS IN AN OXISOL UNDER NO-TILLAGE SYSTEM

ABSTRACT

The no-tillage system (NT) is the most important soil management system for the sustainability of Brazilian agroecosystems. However, cropping systems comprising low diversified crop rotations and intensive machinery traffic may cause strongly-compacted soil layers, impairing the soil functioning and crop yield. Soil compaction is known to change the storage and flow of air and water, which, along with the plant species cropped during soybean off-season, affect the activity and diversity of the microbial community. We evaluated the effects of compaction status and different autumn-winter crops on the metabolic diversity of an Oxisol under NT in Southern Brazil, aiming at finding biological indicators sensitive to soil compaction and uses. The experiment has been carried out since February/2014, following a randomized blocks design in a split plot arrangement, with three replications. Four autumn-winter crops were grown in the plots (palisade grass – *Urochloa brizanta*, black oat – *Avena strigosa*, maize – *Zea mays* or wheat – *Triticum aestivum*), whereas the subplots consisted of three compaction status (CS) (NT chiseled (CS1); NT not chiseled nor additionally compacted (CS2); and NT additionally compacted by eight traffics of a harvester (CS3). In each subplot, soil samples were taken at 0-10 cm in February/2017, to assess the soil metabolic diversity based on Biolog Ecoplate®, containing 31 carbon sources, for estimation of Shannon's diversity index (H') and diversity of substrates (S). Chemical and physical soil properties such as density and porosity were also determined at the same layer. CS effects on metabolic diversity varied according to autumn-winter crops. In the plots cultivated with black oats or corn, CS1 resulted in lower H' and S compared with CS2 and CS3, which did not differ each other. There was no significant effect of CS on H' and S variables in the soil cropped with wheat, except for S at 216 h of incubation. CS1 resulted in higher H' and S compared with CS2 and CS3 under palisade grass. The potential and the consumption rate of the organic substrates were lower in the chiseled NT (CS1) compared with CS2 and CS3 under black oats or corn. Conversely, CS1 presented higher potential and consumption rate of C sources compared with CS2 and CS3 in the plots cultivated with palisade grass, whereas the carbon use kinetics was not influenced by CS under wheat. The bacterial community was negatively influenced by scarification (CS1), under oats and corn, that had lower biomass production and / or production of residues with easier microbial decomposition. The microbiological metabolic profile was sensitive to the CS and autumn-winter crops, making it a reliable indicator of soil biological quality.

Keywords: Metabolic profile. Biolog Ecoplate®. Soil structure. Crop rotation. Soil physical recovery.

4.3 INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto (SPD), dependendo das condições ambientais, pode proporcionar benefícios em comparação ao preparo convencional (PC) como: melhor conservação da água no solo (ALVAREZ; STEINBACH, 2009; PUTTE et al., 2010; JIN et al., 2011); incremento nos teores de carbono orgânico total (BHATTACHARYYA et al., 2009; BABUJIA et al., 2010); aumento na biomassa microbiana na camada superficial do solo (BABUJIA et al., 2010); redução da temperatura máxima diária do solo em regiões tropicais (DERPSCH; SIDIRAS; ROTH, 1986); e aumento da biodiversidade do solo (ADL; COLEMAN; READ, 2005).

Apesar dessas vantagens, um maior grau de compactação na camada de 0,1-0,2 m é observado em quase todas as áreas sob SPD, porém, nem sempre representa limitação significativa ao crescimento das plantas e ao funcionamento do solo (MORAES et al., 2017). A compactação do solo é um problema ambiental mundial de crescente importância que ocorre tanto em áreas cultiváveis e pastagens, bem como em solos florestais (BEYLICH et al., 2010). Pode ser causada pela pressão externa de máquinas (DEBIASI et al., 2008), pelo pisoteio animal (DEBIASI; FRANCHINI, 2012), ou pelo processo natural de acomodação das partículas de solo (HAMZA; ANDERSON, 2005). A baixa diversificação de espécies vegetais no sistema de produção, principalmente no que se refere à baixa adoção de culturas de cobertura do solo, também é um dos principais fatores associados à degradação da qualidade estrutural do solo (NUNES et al., 2014).

Uma das formas de melhorar a qualidade física de solos compactados são sistemas de rotação de culturas envolvendo espécies com elevado potencial de produção de fitomassa da parte aérea e com sistema radicular abundante e agressivo, capazes de romper camadas compactadas e produzir bioporos através dos quais as raízes das culturas sucessoras podem crescer (SILVA; ROSOLEM, 2002).

As alterações ocasionadas pela compactação nos fluxos de ar e água do solo podem modificar a composição e a atividade microbiana, influenciando ainda parâmetros fisiológicos dos microrganismos (BEYLICH et al., 2010; VASCONCELLOS et al., 2013; HOK et al., 2018). No entanto, poucos estudos têm sido realizados com o objetivo de avaliar o efeito do grau de compactação sobre a microbiota do solo, principalmente no que se refere à diversidade metabólica.

A diversidade metabólica é definida pelo número, tipo e taxa de uso de um conjunto de substratos pela comunidade microbiana (ZAK et al., 1994). A avaliação do perfil metabólico por meio do Biolog Ecoplate® é um dos métodos utilizados no estudo da estrutura funcional da comunidade microbiana do solo. Este método mede a intensidade de uso de diferentes fontes de carbono pela microbiota do solo, a partir da redução do tetrazólio utilizado como indicador, determinada colorimetricamente (GARLAND; MILLS, 1991).

Segundo Garland e Mills (1991), é possível classificar e caracterizar comunidades microbianas heterotróficas em diferentes habitats e entre amostras dentro do mesmo habitat com base no perfil de uso de fontes de carbono. Além disso, o perfil metabólico é uma consequência das interações ecológicas entre as diferentes populações e dos efeitos ambientais na expressão de genes pela comunidade microbiana presente (ZAK et al., 1994). Souza et al. (2012) encontraram correlação significativa entre o perfil metabólico (microplacas Biolog Ecoplate®) e a estrutura genética da comunidade bacteriana com base nos resultados de PCR-DGGE em solo do cerrado sob diferentes manejos, e concluindo-se que as alterações na composição das comunidades bacterianas são acompanhadas por variações em suas características funcionais. Assim, o perfil metabólico dos microrganismos do solo e sua relação com o manejo e as culturas constitui-se em informação útil para a melhor compreensão das funções do solo e no monitoramento da sustentabilidade de agroecossistemas (DAS; CHAKRABARTI, 2013).

O objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos da compactação e de diferentes culturas de outono-inverno sob sistema plantio direto sobre a diversidade metabólica da comunidade microbiana do solo, visando inferir sobre a sensibilidade desse método como indicador da qualidade biológica do solo.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Caracterização da Área e do Experimento

O estudo foi realizado em experimento localizado em Londrina/PR (23°11'S; 51°11'W; 620 m altitude), Brasil, em um LATOSSOLO Vermelho distroférico muito argiloso (784 g kg⁻¹ de argila, 144 g kg⁻¹ de silte e 72 g kg⁻¹ de areia na camada de 0-30 cm de profundidade)(SANTOS et al., 2013).O clima da

região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo subtropical úmido (Cfa), sendo a temperatura média anual de 21 °C, com temperatura média máxima de 28,5 °C em fevereiro (mês mais quente) e temperatura média mínima de 13,3 °C em julho (mês mais frio). A precipitação média anual é de 1651 mm, com média de 217 mm em janeiro (mês mais chuvoso) e 60 mm em agosto (mês mais seco).

O experimento foi instalado em fevereiro de 2013, seguindo o delineamento experimental de blocos ao acaso com três repetições, em parcelas subdivididas, compreendendo quatro culturas de outono-inverno nas parcelas e três estados de compactação (EC) nas subparcelas, com dimensões de 5 m X 15 m (ANEXO A). As culturas de outono-inverno nas parcelas consistiram em: (i) aveia preta (*Avena strigosa* Schreb); (ii) braquiária ruziziensis (*Urochloa ruziziensis*); (iii) milho de segunda safra (*Zea mays*) e (iv) trigo (*Triticum aestivum* L.). As culturas de grãos (milho e trigo) foram adubadas conforme resultados da análise de solo e necessidades das culturas (270 kg ha⁻¹ de NPK 08-20-20), em todas as safras, ao passo que as parcelas ocupadas por plantas de cobertura (aveia e braquiária) não receberam adubação. Os estados de compactação do solo nas subparcelas envolveram: (a) EC1- SPD com escarificação na profundidade média de trabalho de 30 cm no início do experimento, na condição de solo friável (conteúdo de água de 0,29 kg kg⁻¹), por meio de um escarificador equipado com rolo destorroador, cinco hastes espaçadas 0,35 m entre si e ponteiras de 0,08 m de largura, realizado uma única vez em fevereiro/2013; (b) EC2- SPD sem compactação adicional por tráfego de máquinas e sem escarificação; (c) EC3- SPD com compactação adicional por oito tráfegos de colhedora com massa de 9,6 Mg, pneus dianteiros Pirelli 18.4-30 R1 e traseiros Pirelli 9.00-16, com pressão de inflação de 410 e 180 kPa, respectivamente. A pressão de contato dos pneus dianteiros da colhedora com o solo foi estimada em 200 kPa, seguindo o procedimento descrito em O'Sullivan, Henshall, e Dickson (1999). O tráfego foi realizado somente na instalação do experimento, em fevereiro de 2013, com um conteúdo de água na camada de 0-0,2 m equivalente à capacidade de campo (0,32 kg kg⁻¹). Após a escarificação ou tráfego da colhedora, todo o experimento foi cultivado com trigo no outono-inverno de 2013, sendo as diferentes culturas referentes aos tratamentos avaliadas a partir do outono-inverno de 2014. No verão, em todos os tratamentos, foi implantada a cultura da soja em todas as safras de condução experimental. A implantação, condução e tratamentos fitossanitários foram realizados de acordo com as

indicações técnicas para a cultura (TECNOLOGIAS...2016)

Quatro anos após a instalação do ensaio, em fevereiro/2017, foram coletadas amostras deformadas na camada de 0-10 cm de profundidade para análise química de solo após secas ao ar e peneiradas (<2 mm). Os atributos determinados, conforme Embrapa (1997): pH(0,01 mol L⁻¹ CaCl₂); Ca, Mg e Al trocáveis, extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e quantificados por titulometria; H+Al, estimado a partir do pH SMP usando curva de calibração para o solo em estudo; e P e K extraídos pelo método Mehlich⁻¹ e quantificados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente. Também foram determinados o carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo, por combustão via seca usando analisador elementar de C.

Nos mesmos pontos, em março/2017, foram coletadas amostras com estrutura preservada por meio de anéis de aço inox (5 cm x 5 cm, 100 cm³), inseridos verticalmente no centro da camada de 0-10 cm. Em laboratório, essas amostras foram utilizadas para determinar densidade do solo (Ds); macroporosidade e microporosidade pelo método da mesa de tensão; e porosidade total pela soma de valores de macro e microporosidade (EMBRAPA, 1997).

4.4.2 Análises Química e Física

Foram coletadas amostras deformadas de solo para análises químicas, em cada subparcela, em fevereiro de 2017, na camada de 0-0,1 m de profundidade, num total de 15 subamostras para formar uma amostra composta e, peneiradas (< 2 mm). Na terra fina seca ao ar (TFSA) foram determinados: pH em 0,01mol L⁻¹ CaCl₂ (EMBRAPA, 1997), Ca, Mg e Al trocáveis extraídos com KCl 1 mol L⁻¹, analisados por titulometria; P e K extraídos em Mehlich-I e analisados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente; carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT) por combustão via seca usando analisador elementar de C, e o S-SO₄⁻.

Nos mesmos pontos, foram coletadas amostras com estrutura preservada por meio de anéis de aço inox (5 cm x 5 cm, 100 cm³), inseridos verticalmente no centro da camada de 0-10cm, para determinar adensidade do solo (DS), macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) pelo método da mesa de tensão, e porosidade total (PT) pela soma da macro e da

microporosidade(EMBRAPA, 1997).

4.4.3 Diversidade Metabólica da Comunidade Bacteriana do Solo

A diversidade metabólica da comunidade bacteriana foi determinada nas amostras deformadas coletadas em fevereiro/2017, mediante o uso de microplacas Biolog Ecoplate® (Biolog, Inc. Hayward, California, USA). Das amostras de solo refrigeradas a 8°C após a amostragem, retirou-se uma alíquota de 5 g, a qual foi suspensa em frascos Erlenmeyer contendo 45 mL de solução salina (0,85% NaCl). Após agitação por 30 minutos a 150 rpm, realizou-se a diluição seriada (2mL em 18mL) até a diluição 10^{-3} para a estimativa da comunidade bacteriana cultivável, pela técnica do número mais provável (NMP) (JAHNEL; CARDOSO; DIAS, 1999). Foram aplicadas alíquotas de 120 μ L do sobrenadante, contendo 10^3 a 10^4 células por mL às cavidades das microplacas Biolog Ecoplate®. Cada microplaca Biolog contém 31 fontes de carbono, em triplicata (INSAN, 1997) (ANEXO B), além de um controle negativo sem nenhuma fonte de carbono além do corante indicador tetrazólio violeta. Estas fontes de carbono são amplamente utilizadas pelos microrganismos e são similares às fontes de carbono encontradas normalmente no solo. Em seguida, as microplacas Biolog foram incubadas a 28°C (GOVAERTS et al., 2007) até o tempo necessário para a obtenção de uma média de desenvolvimento de cor (“*averagewell color development*”, AWCD) de 0,8–1,0 unidade de absorvância para cada placa, conforme adaptado de Garland e Mills (1991) e Zak et al. (1994). O crescimento microbiano em cada uma das 31 fontes de C foi avaliado a partir dos valores de absorvância medidos por espectrofotometria a 590 nm (“*optical density data*”, OD_{590nm}), utilizando um leitor de microplacas. As leituras foram realizadas no tempo zero (T₀), após 12 horas de incubação, e a cada 24 horas, até o final do período de incubação, que foi de 432 horas. Os valores de OD_{590nm} medidos em cada fonte de C foram corrigidos pelas leituras realizadas no controle de cada microplaca. O AWCD foi calculado pela média dos valores OD_{590nm} das 31 fontes de C em cada microplaca.

Os valores de OD_{590nm} de cada cavidade foram normalizados pela divisão dos mesmos pelo AWCD (GARLAND; MILLS, 1991), a fim de minimizar possíveis efeitos de diferença de inóculo entre as amostras. Esses dados foram utilizados para calcular o índice de diversidade de Shannon (H'), que compreende

tanto a riqueza de substratos como a intensidade com que eles foram usados pela microbiota do solo, e a riqueza de substratos (S_s), que corresponde ao valor referente ao número de diferentes substratos que podem ser utilizados pela comunidade microbiana, conforme descrito em Zak et al. (1994). Adicionalmente, os valores de AWCD foram ajustados ao tempo de incubação das placas para avaliar o metabolismo heterotrófico médio e estimar os parâmetros cinéticos, por meio da equação de crescimento proposta por Lindström, Barrye Braddock (1998):

$$AWCD = \frac{K}{1 + e^{-R(T-S)}} \quad (1)$$

onde K é o máximo de desenvolvimento médio de cor das cavidades da microplaca (AWCD); R (taxa de degradação), a taxa exponencial de mudança de AWCD (h^{-1}); T, o tempo de incubação das placas em horas (h); e S, o tempo para atingir o ponto médio da porção exponencial da curva, em $K / 2$ (h).

4.4.4 Análise Estatística

Os dados físico-químicos, índice de diversidade de Shannon (H') e riqueza de substratos (S_s), bem como os coeficientes empíricos obtidos (K, R e S) foram submetidos à análise de variância (ANOVA, teste F, $p < 0,05$) e comparação entre as médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Entre os atributos microbiológicos e bioquímicos, os físico-químicos e os atributos relacionados à diversidade metabólica da comunidade microbiana, foram realizadas análises de correlação, a partir do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson (r). As análises foram realizadas por meio do programa SISVAR (FERREIRA, 2010).

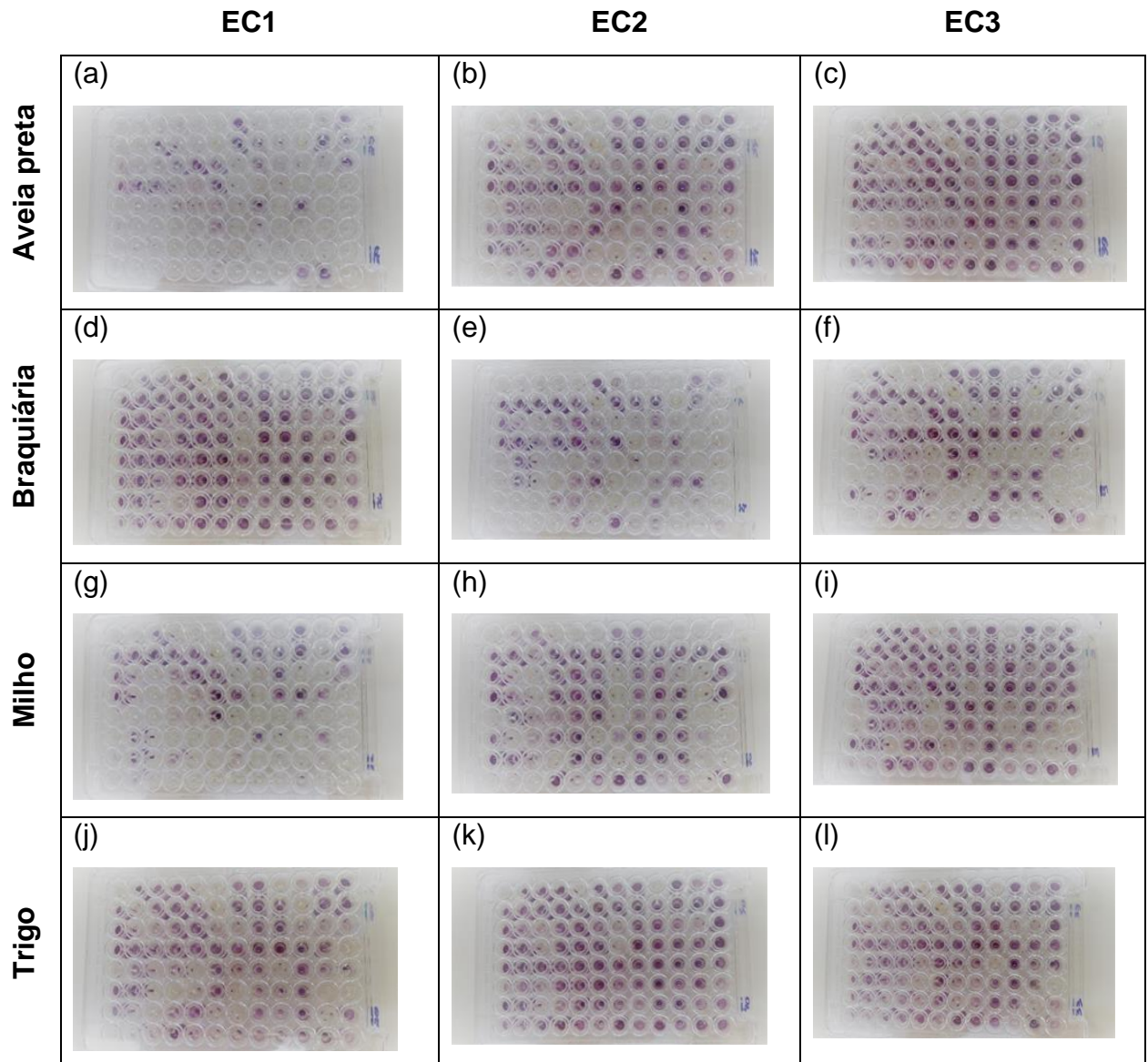
Os dados médios por tratamento da cinética relativa ao AWCD foram ajustados ao tempo de incubação utilizando a equação (1), por análise de regressão por meio do software Statistica v.10 (STATSOFT, 2013).

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O padrão de consumo das 31 fontes de C pela comunidade microbiana do solo após 96 h de incubação, em função dos ECs e das culturas

semeadas no outono-inverno, é ilustrado na Figura 4.1. Cada microplaca é composta por 96 cavidades, contendo as 31 fontes de C, além da testemunha (água), em triplicada. À medida que o tempo de incubação aumenta, nota-se um aumento da intensidade de cor desenvolvida em cada cavidade da microplaca pela redução do tetrazólio decorrente do crescimento microbiano, evidenciando incremento no consumo de C de cada fonte. Adicionalmente, verifica-se grande variação entre os tratamentos quanto ao desenvolvimento de cor nas cavidades com as diferentes fontes de carbono, indicando diferentes capacidades da comunidade microbiana em degradar as diferentes fontes de C, resultante de diferenças em seu perfil metabólico em função das alterações ocasionadas pelos diferentes ECs e culturas de outono-inverno.

Figura 4.1 - Desenvolvimento de cor nos poços contendo as 31 fontes de C e os respectivos controles, em triplicata, nas microplacas Biolog EcoPlate®, após 96 horas de incubação de amostras de solo obtidas em fevereiro/2017 na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico, em função dos estados de compactação [EC1, SPD escarificado (a, d, g, j); EC2, SPD sem compactação adicional e sem escarificação (b, e, h, k); EC3, SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg (c, f, i, l)] e das culturas semeadas no outono-inverno [aveia preta (a, b, c); braquiária ruzizensis (d, e, f); milho (g, h, i); e trigo (j, k, l)].



Fonte: o próprio autor.

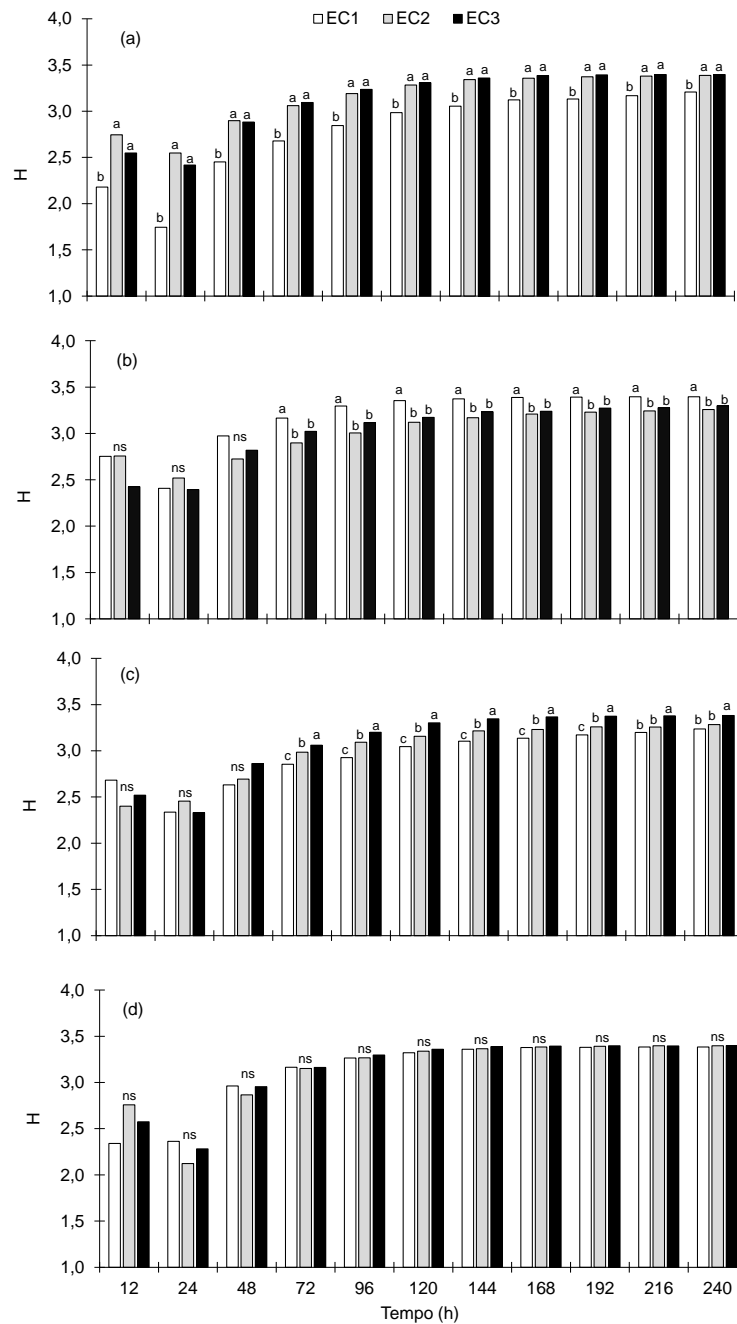
A diversidade metabólica da comunidade microbiana, estimada a partir do índice de diversidade de Shannon (H') (Figura 4.2), assim como a riqueza de substratos utilizados pelos microrganismos (S_s) (Figura 4.3), foram significativamente influenciadas pela interação entre as culturas semeadas no outono-inverno e os ECs. Nas parcelas cultivadas desde 2014 com aveia preta e milho de segunda safra no outono-inverno, a escarificação do solo (EC1), realizada 34 meses antes da amostragem (março/2014), resultou em menor diversidade metabólica e riqueza de substratos utilizados pela microbiota do solo comparativamente aos tratamentos EC2 e EC3 (Figuras 4.2a e 4.2c). No caso da aveia preta, as diferenças foram proporcionalmente maiores nas primeiras 48 h após a incubação, porém persistiram pelo menos até 240 h de avaliação, ou seja, mesmo após a estabilização do consumo dos substratos. Para o milho, os efeitos dos ECs sobre H' e S_s tornaram-se significativos após 72 h de incubação, sendo as maiores diferenças observadas após a estabilização do desenvolvimento de cor. Adicionalmente, os valores de H' e S_s foram, em geral, maiores no EC3 comparativamente ao EC2 na parcelas cultivadas com milho no outono-inverno.

Sob cultivo de braquiária *ruzizensis* (Figuras 4.2b e 4.3b) ou trigo (Figuras 4.2d e 4.3d), a diversidade metabólica e a riqueza de substratos utilizados pela comunidade microbiana responderam de maneira diferente aos ECs. Não houve efeito significativo dos ECs sobre variáveis H' e S_s para o trigo, exceto para a riqueza de substratos medida 216 h após a incubação. Ao contrário do observado para a aveia preta e o milho (Figuras 4.2a, 4.2c, 4.3a e 4.3c), o SPD escarificado (EC1) proporcionou maior diversidade metabólica e riqueza de substratos em relação ao EC2 e ao EC3 nas áreas sob cultivo de braquiária *ruzizensis*. Tais efeitos foram observados a partir da avaliação realizada 72 h após o início do período de incubação, e persistiram pelo menos até 240 h.

O perfil metabólico da comunidade microbiana pode ser descrito também por variáveis como o potencial (K) e a taxa (R) de consumo das fontes de C pelos microrganismos, bem como pelo tempo necessário para atingir 50% de K (S), as quais são obtidos por meio de modelos matemáticos que expressam a cinética de desenvolvimento médio de cor pelo uso das diferentes fontes de C (AWCD) (Tabela 4.1 e Figura 4.4). Graficamente, o valor de K é representado pelo máximo AWCD, quando a curva se torna paralela ao eixo X. Já R refere-se à inclinação da reta formada antes do máximo valor de AWCD (K), representando assim a taxa de

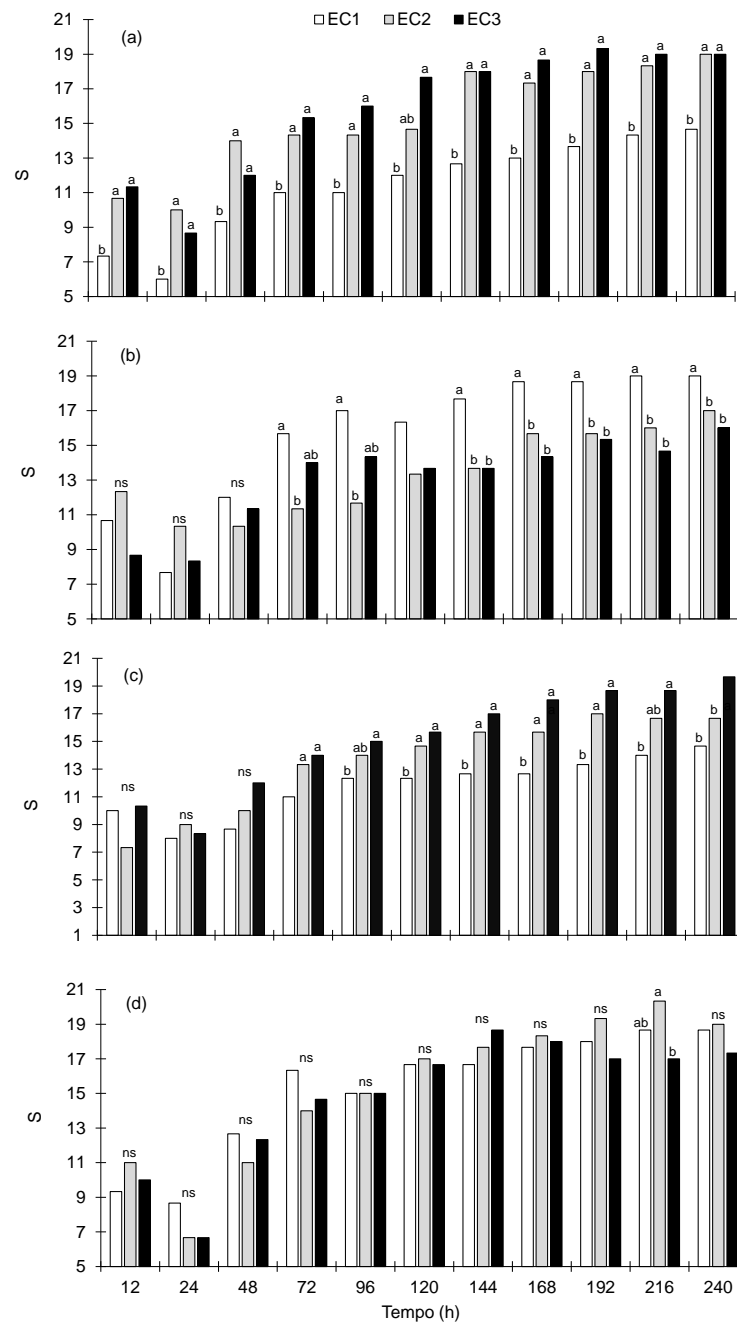
aumento do AWCD ao longo do tempo de incubação. O ajuste do modelo logístico aos dados de AWCD foi significativo pelo Teste F ($p < 0,0001$) para todos os tratamentos, com valores de R^2 superiores a 0,96 (dados não apresentados).

Figura 4.2 - Índice de diversidade de Shannon (H'), obtido com base no uso de fontes de carbono nas microplacas Biolog EcoPlate® pela comunidade microbiana, em solo obtido em fevereiro/2017 na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico, sob cultivo de aveia preta (a), braquiária ruziziensis (b), milho (c) e trigo (d) no outono inverno e diferentes estados de compactação (EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg).



*Letras distintas indicam diferenças significativas entre os ECs pelo teste de Tukey (P < 0,05); ns = diferenças não significativas (teste F, P < 0,05). Fonte: o próprio autor.

Figura 4.3 - Riqueza de substratos (Ss), obtida com base no uso de fontes de carbono nas microplacas BiologEcoPlate® pela comunidade microbiana, em solo obtido em fevereiro/2017 na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico, sob cultivo de aveia preta (a), braquiária ruziziensis (b), milho (c) e trigo no outono inverno e diferentes estados de compactação (EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg).



*Letras distintas indicam diferenças significativas entre os ECs pelo teste de Tukey ($P < 0,05$); ns = diferenças não significativas (teste F, $P < 0,05$).

Fonte: o próprio autor.

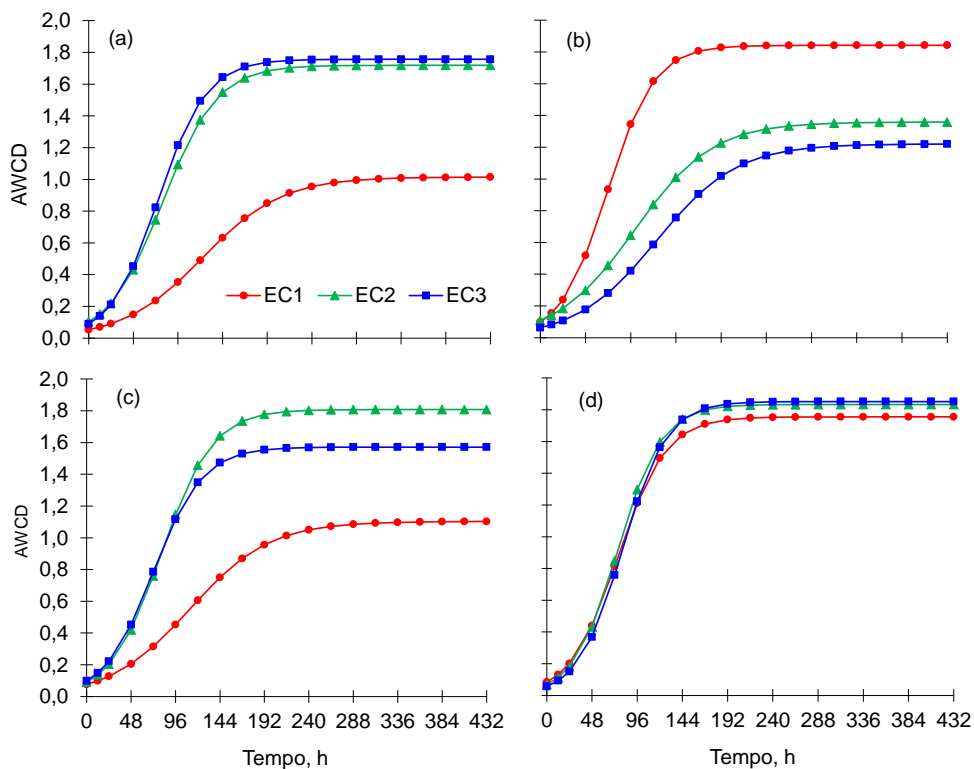
Tabela 4.1 - Coeficientes empíricos do modelo logístico de Lindström, Barrye Braddock (1998), representando a cinética de desenvolvimento médio de cor (*average well colour development – AWCD*) pelo uso das fontes de carbono em microplacas Biolog EcoPlate® inoculadas com solo obtido em fevereiro/2017 na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico, em função dos estados de compactação (EC) e das culturas de outono-inverno.

EC ⁽¹⁾	Culturas de outono-inverno			
	Aveia	Braquiária	Milho	Trigo
	----- <i>K</i> ⁽²⁾ -----			
EC1	1,01 b	1,81 a	1.10 c	1,75 a
EC2	1,72 a	1,22 b	1.58 b	1,85 a
EC3	1,76 a	1,36 b	1.81 a	1,83 a
	----- <i>R</i> ⁽³⁾ -----			
EC1	0,023 b	0,043 a	0,023 b	0,043 a
EC2	0,037 a	0,023 b	0,037 a	0,047 a
EC3	0,040a	0,023 b	0,040 a	0,043 a
	----- <i>S</i> ⁽⁴⁾ -----			
EC1	122,0 a	67,8 b	112,9 a	75,8 a
EC2	79,8 b	123,4 a	74,6 b	80,8 a
EC3	76,0 b	101,6 a	80,5b	74,4 a

⁽¹⁾ EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg; ⁽²⁾ K = potencial de consumo das fontes de C pelos microrganismos; ⁽³⁾ R = taxa de consumos das fontes de C pelos microrganismos; ⁽⁴⁾ tempo para atingir o ponto médio da porção exponencial da curva, em $K / 2$ (h). *Letras distintas indicam diferenças significativas entre os ECs pelo teste de Tukey ($P < 0,05$); ns = diferenças não significativas (teste F, $P < 0,05$).

Fonte: o próprio autor.

Figura 4.4 - Cinética do desenvolvimento médio de cor (*average well colour development* – AWCD) pelo uso das fontes de carbono em microplacas Biolog EcoPlate® inoculadas com solo obtido em fevereiro/2017 na camada de 0,0-0,1 m de um LATOSSOLO Vermelho distroférico sob cultivo de aveia preta (a), braquiária ruziziensis (b), milho (c) e trigo (d) no outono-inverno, e diferentes estados de compactação (EC1 = SPD escarificado; EC2 = SPD sem compactação adicional e sem escarificação; EC3 = SPD com compactação adicional por oito passadas de uma colhedora com massa de 9,6 Mg).



Dados médios por tratamento, ajustados por análise de regressão ao modelo $AWCD = K/(1+\exp(-R*(T-S)))$, onde: T = tempo de incubação, h; K, R e S = parâmetros de ajuste do modelo aos dados observados.

Fonte: o próprio autor.

Em geral, a cinética do AWCD (Figura 4.4) e os coeficientes empíricos da equação 1 (K, R e S) variaram em função dos tratamentos de modo semelhante aos valores de H' e S (Figuras 4.2 e 4.3). Assim, o potencial (K) e a taxa de consumo dos substratos orgânicos (R) foram menores no SPD escarificado (EC1) comparativamente aos demais ECs nos tratamentos envolvendo o cultivo de aveia preta (Figura 4.4a) ou milho (Figura 4.4c). Nas parcelas sob braquiária, o EC1 apresentou maior potencial e taxa de consumo das fontes de C em relação ao EC2 e EC3, enquanto que, no caso do trigo, a cinética do AWCD não foi influenciada pelos

ECs (Figura 4.4d). Já a resposta do coeficiente S (tempo dos microrganismos consumirem 50% de K) aos tratamentos foi oposta à observadas para os parâmetros R e S (Tabela 4.1). Nas parcelas cultivadas com aveia ou milho no outono-inverno de 2016, o valor de K foi significativamente maior no EC1 do que no EC2 e EC3, mas não houve diferenças entre os ECs para o trigo. Por outro lado, o K foi significativamente inferior no EC1 em relação aos demais ECs sob cultivo de braquiária.

Conforme apresentado na Tabela 4.2, o potencial de consumo das fontes de C, assim como o índice de diversidade de Shannon e a riqueza de substratos, não correlacionaram-se significativamente com os atributos microbiológicos e bioquímicos determinados na amostragem de fevereiro/2017 (Figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5, item 3.5.1 do Artigo A). Por outro lado, a taxa de consumo dos substratos (R) e o tempo para atingir 50% de K (S) apresentaram, respectivamente, correlações positivas e negativas com a RB e o CBM. Em termos gerais, isto indica que a velocidade de consumo dos substratos aumentou com o incremento da biomassa e atividade microbianas.

Os índices de diversidade de Shannon (H') e a riqueza dos substratos (S_s) não se correlacionaram significativamente com a maioria dos atributos químicos e físicos do solo (Tabela 4.2), com exceção do H' , que surpreendentemente correlacionou-se negativamente com o COT, e da S_s , que diminuiu com o aumento da acidez potencial ($H+Al$). Entretanto, os valores de K, S e, em menor grau, R, correlacionaram-se negativamente ao aumento do volume de poros do solo, especialmente de macroporos. Tal resultado reflete principalmente os efeitos negativos na escarificação sobre a diversidade metabólica da comunidade microbiana.

A cinética de uso das fontes de C nas microplacas foi prejudicada pelo aumento da acidez do solo (Tabela 4.2), com incrementos no potencial e na taxa de uso dos substratos em função do aumento do pH, dos teores de bases trocáveis e da V%. O parâmetro S foi o que apresentou melhores correlações com os parâmetros de acidez, indicando redução do tempo para atingir 50% de K em resposta ao aumento do pH, da V% e, principalmente, dos teores de bases trocáveis. Este dados são coerentes com os obtidos no Artigo A, onde a RB, o qCO_2 e a atividade da arilsulfatase foram beneficiadas pela redução da acidez na segunda, terceira e quarta coletas (Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6, item 3.5.3). Neste sentido,

alterações na composição e reduções na atividade e biomassa da comunidade microbiana do solo têm sido reportadas na literatura (ANDERSON; DOMSCH, 1993; FIERER; JACKSON, 2006). Similarmente, Nakatani et al. (2012) obtiveram correlações positivas entre a taxa de consumos dos substratos (R) e as variáveis pH e teor de Ca^{2+} .

Tabela 4.2 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os atributos microbiológicos/bioquímicos, físicos, químicos e os atributos relacionados à diversidade metabólica da comunidade bacteriana de um LATOSSOLO Vermelho distroférico sob diferentes estados de compactação e coberturas de outono-inverno, em amostragem realizada na camada de 0,0-0,1 m em fevereiro/2017.

Atributos microbiológicos, físicos e químicos	Diversidade metabólica da comunidade microbiana				
	K	R	S	H'	Ss'
RB	0,29	0,34*	-0,42**	-0,12	-0,00
CBM	0,29	0,33*	-0,44**	-0,38*	-0,10
qCO ₂	-0,04	-0,02	-0,03	0,04	-0,03
FOSF	-0,04	0,11	-0,24	-0,28	-0,04
CEL	0,03	0,08	-0,15	0,12	0,17
AriIS	0,21	0,14	-0,32	-0,25	0,18
GLU	0,17	0,22	-0,29	-0,32	-0,11
DS	0,32	0,19	-0,17	0,09	0,03
Macro	-0,43**	-0,31	0,35*	0,10	0,08
Micro	0,21	0,18	-0,14	0,05	0,04
PT	-0,48**	-0,33*	0,41**	0,19	-0,09
COT	0,23	0,16	-0,30	-0,34*	-0,29
CL	-0,36*	-0,49**	0,47**	0,26	0,06
NT	0,31	0,26	-0,43*	-0,30	-0,17
P	0,35*	0,48**	-0,31	0,05	-0,01
pH	0,34*	0,35*	-0,36*	-0,02	0,32
Al ³⁺	-0,28	-0,28	0,43	0,23	-0,22
H+Al	-0,29	-0,29	0,32	0,05	-0,35*
Ca ²⁺	0,39*	0,43**	-0,50**	-0,13	0,22
Mg ²⁺	0,27	0,33*	-0,41**	-0,10	0,29
K ⁺	0,09	0,14	-0,01	0,18	0,24
CTC	0,23	0,38*	-0,44**	-0,16	-0,18
V%	0,34*	0,37*	-0,41**	-0,08	0,31
S-SO ₄	-0,20	-0,26	0,41**	0,12	0,16

(1) RB= respiração basal do solo; CBM= carbono da biomassa microbiana; qCO₂= quociente metabólico; FOSF= atividade da fosfatase; CEL= atividade da celulase; AriIS= atividade da arilsulfatase; GLU= atividade da

glutaminase; DS = densidade do solo; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; PT = porosidade total; COT = carbono orgânico total; CL = carbono lábil (solúvel em K_2SO_4 0,5 M L⁻¹); NT = nitrogênio total do solo; CTC = capacidade de troca de cátions a pH 7,0; V% = saturação por bases (%). * e ** = correlações significativas a 5% e 1% respectivamente. Fonte: o próprio autor.

A diversidade metabólica da comunidade microbiana foi muito pouco influenciada pelos teores de COT e NT (Tabela 4.2), o que pode ser explicado pela pequena variação destes atributos entre as amostras estudadas. Contudo, os valores de K e R correlacionaram-se negativamente, e os de S positivamente, ao CL, indicando que a diversidade metabólica foi prejudicada pelo aumento na concentração de compostos orgânicos de maior labilidade, obtidos por oxidação em $KMnO_4$. Similarmente, houve correlação negativa entre o CBM e o CL na quarta amostragem (Tabela 3.6, artigo A, item 3.5.3). Neste trabalho, o CL pode ter refletido maior concentração de compostos orgânicos de baixa biodisponibilidade, justificando sua relação negativa com a cinética de consumos das fontes de C.

A estrutura metabólica da comunidade microbiana do solo depende da diversidade genética, do ambiente físico e químico e das interações que ocorrem entre diferentes populações (ZAK et al., 1994), fatores esses que dependem das práticas de manejo adotadas (CHAER et al., 2009; SOUZA et al., 2012). A quantidade, qualidade e diversidade do material orgânico aportado ao solo no sistema de produção constituem-se nos principais determinantes da estrutura e atividade da microbiota do solo (NDAW et al., 2009). Porém, atributos físicos como a densidade e porosidade, e químicos, como o pH e a disponibilidade de nutrientes, também são importantes (CHAER et al., 2009; PENGTHAMKEERATI, MOTAVALLI; KREMER, 2011; NAKATANI et al., 2012). No presente estudo, o perfil metabólico dos microrganismos foi sensível aos impactos ocasionados pelos ECs e pelas culturas semeadas no outono-inverno, apresentando assim potencial para uso como indicador de qualidade biológica do solo. Tal sensibilidade é reforçada pelo fato de o perfil metabólico da microbiota ter sido fortemente influenciado pela interação entre ECs x culturas semeadas no outono-inverno, o que também evidencia a complexidade envolvida na resposta da comunidade microbiana aos fatores ambientais modificados pelo manejo do solo.

A diversidade metabólica, assim como o potencial e a taxa de consumo de substratos orgânicos pela comunidade microbiana, foram negativamente influenciados pela mobilização do solo via escarificação, quando sob cultivo de espécies vegetais caracterizadas pela menor produção de biomassa (parte

aérea e, principalmente, raízes) e/ou com a produção de resíduos mais facilmente decomponíveis pela biota do solo. Este resultado assemelha-se ao obtido a partir da análise dos indicadores microbiológicos e bioquímicos via ACD na quarta amostragem (Artigo A, item 3.5.4). Souza et al. (2012), avaliando o perfil metabólico de comunidades microbianas em diferentes usos de um LATOSSOLO na região dos Cerrados, encontraram que o preparo convencional diminuiu a diversidade metabólica em relação ao SPD, evidenciando o efeito negativo do revolvimento do solo sobre a microbiota.

Uma possível explicação para esse comportamento pode estar relacionada à maior disponibilidade de O₂ associada ao aumento do volume de macroporos no SPD escarificado (Tabela 3.2, artigo A, item 3.5.1) o que, concomitantemente à produção de biomassa em menor quantidade e/ou menor recalcitrância, proporcionou a rápida mineralização dos resíduos vegetais de milho e aveia. Assim, no momento da coleta de solo para avaliação do perfil metabólico (fevereiro/2017), cerca de sete e quatro meses após a colheita ou manejo do milho e da aveia, respectivamente), os microrganismos encontravam-se menos ativos metabolicamente, devido à baixa disponibilidade de fontes de energia. Considerando essas mesmas culturas, a taxa de decomposição da biomassa vegetal pode ter sido diminuída pela menor aeração do solo nos tratamentos com maior grau de compactação (EC2 e EC3), proporcionando posteriormente maior disponibilidade de fontes de energia para o estabelecimento de uma microbiota mais diversa e com maior atividade. Neste contexto, Nakatani et al. (2012) observaram menores diversidade metabólica e consumo dos substratos nas microplacas Biolog EcoPlate® em função de doses crescentes de lodo de curtume quando a avaliação foi realizada 271 dias após a aplicação do lodo, em comparação com a realizada aos 12 dias.

Ao contrário do observado para a aveia preta e o milho, a diversidade metabólica e o consumo das fontes de C nas microplacas Biolog EcoPlate® foram maiores no EC1 comparativamente aos demais ECs nas áreas cultivadas com braquiária *ruzizensis* no outono-inverno. Adicionalmente, no tratamento EC1 + braquiária *ruzizensis*, os valores de H', Ss e a cinética de uso dos substratos orgânicos pelos microrganismos foram similares aos obtidos no EC2 e no EC3 sob cultivo de aveia, trigo ou milho. Isto indica que o cultivo de uma espécie vegetal com alto potencial de aporte de fitomassa da parte aérea e raízes, como a braquiária *ruzizensis*, foi capaz de compensar os possíveis efeitos negativos do

revolvimento do solo pela escarificação sobre o perfil metabólico das comunidades microbianas, os quais encontram-se possivelmente relacionados à limitação de fontes de energia à época da amostragem, em função da rápida mineralização da biomassa vegetal, quando presente em menores quantidades e/ou quando apresenta baixa recalcitrância.

Em contrapartida, os valores de H' e S_s , assim como o potencial e as taxas de consumo de fontes de C pelos microrganismos, foram inferiores nos tratamentos com braquiária *ruzizensis* em relação às demais culturas, no EC2 e EC3. A maior imobilização e mais lenta mineralização de N do solo, frequentemente observada em áreas com menor disponibilidade de O_2 e na presença de grande quantidade de fitomassa de alta relação C/N, como a fornecida pela braquiária, pode ter diminuído os teores de N mineral no solo e, assim, limitado o crescimento e a atividade microbiana. A limitação de N no solo é particularmente importante para bactérias, que apresentam em geral menor relação C/N que os fungos, constituindo-se na classe de microrganismos que determina o uso das fontes de C disponíveis nas microplacas (ZAK et al., 1994; HU et al., 1999). Correlações positivas e significativas entre os parâmetros empíricos R e S do modelo de cinética do AWCD e a concentração de N mineral no solo foram obtidas por Nakatani et al. (2012). Essas relações também serão exploradas em trabalhos futuros visando estabelecer relação entre os mais diversos atributos do solo e os parâmetros do modelo de cinética de uso das fontes de carbono.

Em linhas gerais, os parâmetros relacionados à diversidade metabólica responderam aos ECs e, principalmente, às culturas de outono-inverno, de maneira similar aos indicadores microbiológicos e bioquímicos determinadas na quarta época de amostragem, quando avaliados pela ACD (artigo A, item 3.5.4). Um aspecto importante a ser considerado é que a ACD não permitiu inferir sobre a interação entre os ECs e as culturas de outono-inverno, o que explica algumas diferenças na interpretação. Mesmo assim, a braquiária e o trigo ficaram em grupos diferentes em relação à aveia e ao milho, na análise das médias dos escores canônicos obtidos pela FCD1 (Tabela 3.10, artigo A, item 3.5.4), resultado similar ao obtido por meio dos coeficientes K, R, S, índice de diversidade de Shannon e riqueza de substratos, que demonstraram que as diferenças entre os ECs seguiram o mesmo padrão na aveia e no milho. Ainda de acordo com a ACD, o EC1 impactou negativamente a comunidade microbiana na quarta amostragem (Tabela 3.9, artigo

A, item 3.5.4), o que também ocorreu para a diversidade metabólica e para cinética de consumo de substratos, porém de forma restrita às parcelas sob cultivo de milho e aveia.

4.6 CONCLUSÕES

A comunidade bacteriana foi negativamente influenciada pela mobilização do solo via escarificação (EC1), quando sob cultivo de aveia e milho, caracterizadas pela menor produção de biomassa (parte aérea e, principalmente, raízes) e/ou com maior facilidade de decomposição pela biota do solo.

O perfil metabólico dos microrganismos foi sensível aos impactos ocasionados pelos ECs e pelas culturas semeadas no outono-inverno sobre o solo, apresentando assim potencial para uso como indicador biológico da qualidade do solo sob diferentes coberturas vegetais e manejos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A degradação da qualidade estrutural do solo em função da compactação excessiva influencia negativamente a comunidade microbiana do solo, o que pode comprometer a execução das inúmeras funções atribuídas aos microrganismos, com reflexos negativos sobre a produtividade das culturas e sobre o ambiente.

Considerando experimentos de curta a média duração, como o utilizado nesta tese, a resposta dos indicadores microbiológicos e bioquímicos de qualidade do solo a diferentes espécies vegetais cultivadas no outono-inverno depende da biodisponibilidade de fontes de energia. Nesta situação, a sensibilidade ao manejo e a magnitude dos atributos biológicos vai depender da quantidade e qualidade da fitomassa adicionada, bem como da época de avaliação em relação ao manejo/colheita das culturas estudadas. Espera-se que em longo prazo, os efeitos benéficos resultantes do uso de culturas de cobertura na entressafra da soja, como a aveia e a braquiária, confirmem ao solo um novo estado de equilíbrio dinâmico, que minimize o impacto de variações sazonais nos indicadores microbiológicos e bioquímicos de qualidade do solo.

A análise canônica discriminante (ACD) permitiu identificar os atributos microbiológicos e bioquímicos com maior sensibilidade aos estados de compactação (ECs) e as culturas de outono-inverno. Entretanto, os atributos que apresentaram maior sensibilidade ao manejo variaram conforme a época de amostragem, sinalizando a necessidade de um conjunto mínimo de indicadores para avaliar a qualidade biológica do solo.

Entre os atributos avaliados, a atividade da glutaminase contribuiu para diferenciar os estados de compactação e as culturas de outono inverno na maioria das épocas de avaliação. Além disso, a atividade da glutaminase foi relativamente estável na comparação entre as amostragens. Essas características tornam a atividade da glutaminase um atributo com potencial para uso como indicador de qualidade do solo.

A atividade da celulase também apresenta grande potencial para uso como indicador de qualidade biológica do solo, especialmente em resposta à qualidade estrutural do solo. Porém, é essencial que ela seja determinada em época com maior abundância de celulose no solo, o que geralmente ocorre após a colheita

ou manejo das culturas de outono-inverno.

O perfil metabólico dos microrganismos é sensível aos impactos ocasionados pelos estados de compactação e pelas culturas semeadas no outono-inverno, apresentando potencial para uso como indicador de qualidade do solo. A comunidade microbiana foi negativamente influenciada pela mobilização do solo via escarificação, quando sob cultivo de espécies vegetais caracterizadas pela produção de biomassa (parte aérea e, principalmente, raízes) em menor quantidade e/ou com maior facilidade de decomposição pela biota do solo.

REFERÊNCIAS

- ABDOLLAHI, L.; HANSEN, E. M.; RICKSON, R. J.; MUNKHOLM, L.J. Overall assessment of soil quality on humid sandy loams: Effects of location, rotation and tillage. **Soil Tillage and Research**, v. 145, p. 29–36, 2015.
- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.519-531, 2004.
- ADL, S.M.; COLEMAN, D.C.; READ, F. Slow recovery of soil biodiversity in sandy loam soils of Georgia after 25 years of no-tillage management. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v. 114, n. 323–334, 2005.
- ALEF, K. Soil respiration. In: ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic Press, p. 214-219. 1995.
- ANDERSON, T.H.; DOMSCH, K.H. The metabolic quotient form CO² (q_{CO^2}) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v.25, p.393-395, 1993.
- ANDRADE, J. G. **Perdas de água por evaporação de um solo cultivado com milho nos sistemas de plantio direto e convencional**. 2008. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- ARAÚJO, A.S.F.; MONTEIRO, R.T.R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 3, p. 66-75, 2007.
- ALVAREZ, R.; STEINBACH, H. S. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. **Soil and Tillage Research**, v. 104, n. 1, p. 1-15, 2009.
- BA, L. T.; VAN, K. L.; van ELSACKER, S.; CORNELIS, W. M. Effect of cropping system on physical properties of clay soil under intensive rice cultivation. **Land Degradation and Development**, 2014.
- BABUJIA, L.C.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J.C.; BROOKES, P.C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 2174–2181, 2010.
- BALOTA, E. L.; COLOZZI-FILHO, A.; ANDRADE, D. S.; DICK, R. P. Microbial biomass in soils under different tillage and crop rotation systems. **Biology & Fertility of Soils**, v. 38, p. 15–20, 2003.
- BARDGETT, RICHARD D.; VAN DER PUTTEN, WIM H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. **Nature**, v. 515, n. 7528, p. 505-511, 2014.

BARETTA, D.; BARETTA, C. R. D. M.; CARDOSO, E. J. B. N. Análise multivariada de atributos microbiológicos e químicos do solo em florestas com *Araucaria angustifolia*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2683-2691, 2008.

BARETTA, D.; BROWN, G. G.; CARDOSO, E.J.B.N. Potencial da macrofauna e outras variáveis edáficas como indicadores da qualidade do solo em áreas com *Araucaria angustifolia*. **Acta Zoológica Mexicana**, v.2, p.135-150, 2010.

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v.62, p. 59-68, 2011.

BARDGETT, R. D.; van der PUTTEN, W. H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. **Nature**, v. 515, p. 505-511, 2014.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A.C.T.; FRANCHINI, J.C.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Compactação em um LATOSSOLO Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.681-691, 2010.

BEYLICH, A.; OBERHOLZER, H. R.; SCHRADER, S.; HÖPER, H.; WILKE, B. M. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. **Soil and Tillage Research**, v. 109, n. 2, p. 133-143, 2010.

BINI, D.; SANTOS, C. A.; BERNAL, L. P. T; ANDRADE, G.; NOGUEIRA, M. A. Identifying indicators of C and N cycling in a clayey Ultisol under different tillage and uses in winter. **Applied Soil Ecology**, v. 76, p. 95-101, 2014.

BODY, S.A; MORTLAND, M.M. Enzyme interactions with clays and clay-organic matters complexes. In: BOLLAG, J.M.; STOTZKY, G. **Soil Biochemistry**, v.6, p. 1-28, 1990.

BHATTACHARYYA, R.; PRAKASH, V.; KUNDU, S.; SRIVASTVA, A. K.; GUPTA, H.S. Soil aggregation and organic matter in a sandy clay loam soil of the Indian Himalayas under different tillage and crop regimes. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v. 132, p. 126–134, 2009.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 605-614, 2006.

BRELAND, T. A.; HANSEN, S. Nitrogen mineralization and microbial biomass as affected by soil compaction. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 28 p.655–663, 1996.

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T.; BABEL, U. **Handbook for soil thin section description**. Wolverhampton, Waine Research Publication, 152p. 1985.

CALONEGO, J. C.; RAPHAEL, J. P.; RIGON, J. P.; DE OLIVEIRA NETO, L.; ROSOLEM, C. A. Soil compaction management and soybean yields with cover crops

under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, v. 85, p. 31-37, 2017.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Soil aggregate stability after management with crop rotation and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1399-1407, 2008.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. **European Journal Agronomy**, v. 33, p. 242-249, 2010.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Least Limiting Water Range in soil under crop rotations and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 759-771, 2011.

CARDOSO, E. J. B. N.; VASCONCELLOS, R. L. F.; BINI, D.; MIYAUCHI, Y. H.; SANTOS, C. A. dos; ALVES, P. R. L.; PAULA, A. M. de; NAKATANI, A. S.; PEREIRA, J. de M.; NOGUEIRA, M. A. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? **Scientia Agricola**, v. 70, n. 4p. 274-289, 2013.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.527-538, 1998.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; GONÇALVES, A. C. A.; COSTA, A. C. S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 137-147, 2006.

CERVANTES, V. N. M. **Bioindicadores de qualidade do solo sob diferentes intensidades de uso na região dos campos gerais, Paraná**. 80 f. 2017. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Microbiologia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

CHAER, G.; FERNANDES, M.; MYROLD, D.; BOTTOMLEY, P. Shifts in microbial community composition and physiological profiles across a gradient of induced soil degradation. **Soil Science Society American Journal**, v. 73, p.1327-1334, 2009.

CHAMEN, W. T. C.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMERD, C; SPOOR, G.; TIJINK, F.; WEISSKOP, P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2. Equipment and field practices. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1-2, p. 161-174, 2003.

CHAN, K. Y.; HEENAN, D. P. The influence of crop rotation on soil structure and soil physical properties under conventional tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 37, p.113-125, 1996.

CHEN, G.; WEIL, R. R.; HILL, R. L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil & Tillage Research**, v.136, p.61-69, 2014.

CHEN, Y.L.; PALTA, J.; CLEMENTS, J.; BUIRCHELL, B.; SIDDIQUE, K.H.M.; RENGEL, Z. Root architecture alteration of narrow-leaf ed lupin and wheat in response to soil compaction. **Field and Crop Research**,v.165, p. 61–70, 2014.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.933-942, 2008.

CONTE, O.; FLORES, J. P. C.; CASSOL, L. C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; LEVIEN, R.; WESP, C. L. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1301-1309, 2011.

CONTE, O.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; XAVIER, A. A. P.; DEBIASI, H. Demanda de tração, mobilização de solo na linha de semeadura e rendimento da soja, em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 10, p. 1254-1261, 2009.

CORDEIRO, M. A. S.; CORA, J. E.; NAHAS, E. Atributos bioquímicos e químicos do solo rizosférico e não rizosférico de culturas em rotação no sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, P.1794-1803, 2012.

CORSINI, P. C.; FERRAUDO, A. S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 289-298, 1999.

COSTA, M. S. S. de M.; PIVETTA, L. A.; COSTA, L. A. de M.; PIVETTA, L. G.; CASTOLDI, G.; STEINER, F. Atributos físicos do solo e produtividade do milho sob sistemas de manejo e adubações. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 810-815, 2011.

CZYZ, E.A. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. **Soil and Tillage Research**,v. 79, p. 153–166, 2004.

DAS, B.; CHAKRABARTI, K. Assessment of community level physiological profiles and molecular diversity of soil bacteria under different cropping systems.**Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 37, n. 4, p. 468-474, 2013.

DALL'AGNOL, A.; SILVA FILHO ,P. M.**Por que adotar o plantio direto**. Disponível em: <<http://blogs.canalrural.com.br/embrapasoja/2017/11/28/por-que-adotar-o-plantio-direto/>>. Acesso em: 01 fev de 2018.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TRIEN, C. R.; CONTE, O.; MAZURANA, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1369-1377, 2008.

DEBIASI, H; LEVIEN, R.; TREIN, C.R.; CONTE, O. KAMIMURA, K.M. Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 6, p. 603-612, 2010.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Atributos físicos do solo e produtividade da soja em

sistema de integração lavoura-pecuária com braquiária e soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 7, p. 1180-1186, jul. 2012.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; CONTE, O. **Diversificação de espécies vegetais como fundamento para a sustentabilidade da cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2015. 60 p. (Embrapa Soja. Documentos 366).

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Desafios à caracterização de solo fértil em manejo e conservação do solo e da água. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 6, 2006, Passo Fundo. **Fertilidade em solo... (re) emergindo sistêmica: resumos e palestras**. Passo Fundo: Embrapa Trigo: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2006. 8 p. 1 CD ROM.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; ROTH, C.H. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**. v. 8, p. 253–263, 1986.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, v. 11, N. 3-4, p. 199-238, 1988.

DEXTER, A. R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil and Tillage Research**, v. 20, p. 87-100, 1991.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 175-182, 1996.

DIBA, F., SHIMIZU, M.; HATANO, R. Effects of soil aggregate size, moisture content and fertilizer management on nitrous oxide production in a volcanic ash soil. **Soil Science of Plant Nutrition**, v. 57, p. 733-747, 2011.

DICK, R. P.; BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J. W. e JONES, A.J., eds. **Methods for assessing soil quality**. Madison, Soil Science Society of America, 1996. p.247-272. (SSSA Special Publication, 49).

DICK, R. P.; MYROLD, D. D.; KERLE, E. A. Microbial biomass and soil enzyme activities in compacted and rehabilitated skid trail soil. **Soil Science Society American Journal**, v. 52, p. 512-516, 1988.

DINESH, R.; CHAUDHURI, S. G.; GANESHAMURTHY, A. N.; DEY, C. Changes in soil microbial indices and their relationships following deforestation and cultivation in wet tropical forests. **Applied Soil Ecology**, v. 24: 12-26, 2003.

DIEKOW, J. **Estoque e qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada no sistema plantio direto**. 164 f. 2003. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Org.) **Defining soil quality**

for a sustainable environment. Madison: SSSA, 1994. p. 3-21.

DORAN, J. W.; SARRANTONIO, M.; LIEBIG, M. Soil health and sustainability. In: SPARKS, D.L. (Org.) **Advances in Agronomy.** San Diego: Academic Press, 1996. p. 1-54.

DORAN, J.W.; SAFLEY, M. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. p. 1-28. In: PANKHURST, C.E.; DOUBE, B.M.; GUPTA, V.V.S.R.; eds. **Biological Indicators of Soil Health.** CAB International, New York, NY, USA. 1997.

DUFRANC, G.; DECHEN, S. C. F.; FREITAS, S.S.; CAMARGO, O. A. Atributos físicos, químicos e biológicos relacionados com a estabilidade de agregados de dois Latossolos em plantio direto no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28 p. 505-517, 2004.

DUMANSKI, J.; PIERI, C. Land quality indicators: research plan. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.81, p.155-162, 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo.** 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FEBRAPDP (Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha). **Evolução da Área Cultivada no Sistema de Plantio Direto na Palha e Brasil**; Disponível em: <<http://febrapdp.org.br>>. Acesso em: 20jan 2018.

FERREIRA, D.F. SISVAR – **Sistema de análise de variância.** Versão 5.3. UFLA, Lavras, 2010.

FIERER, N.; JACKSON, R. B. The diversity and biogeography of soil bacterial communities. **Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America.**v.103, p. 626–631, 2006.

FRANCHINI, J. C.; CRISPINO, C. C., SOUZA, R. A., TORRES, E.; HUNGRIA, M. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 92, p. 18-29, 2007.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca.** Londrina: Embrapa Soja, 2009. 39 p. (Embrapa Soja. Documentos, 314).

FRANCHINI, J.C.; COSTA, J.M.; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná.** Londrina: EmbrapaSoja, 2011. 52p. (EmbrapaSoja.Documentos, 327).

FRANCO, A. L. C.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, E. E. P.; GUIMARÃES, R. M. L.; CERRI, C. C. Relating the visual soil structure status and the abundance of soil engineering invertebrates across land use change. **Soil & Tillage Research**, v.173, p. 49-52, 2017.

FRANKENBERGER, W. T.; TABATABAI, M. A. L-glutaminase activity of soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 23, p. 869-874, 1991.

GARBEVA, P.; van VEEN, J. A.; van ELSAS, J. D. Microbial diversity in soil: selection of microbial populations by plant and soil type and implications for disease suppressiveness. **Annual Reviews of Phytopathology**, v. 42, p. 243-270, 2004.

GARLAND, J.L.; MILLS, A.L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community level sole carbon source utilization. **Applied and Environmental Microbiology**, v.57, p.2351-2359, 1991.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 477-484, 2004.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, v. 39, n. 1 p. 65-73, 2009.

GIL-SOTRES, F.; CEPEDA-TRASAR, C.; LEIRÓS, M.C.; SEOANE, S. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. **Soil Biology and Biochemistry**, v.37, p.877-887, 2005.

GOLDCHIN, A.; BALDOCK, J. A.; OADES, J. M.A model linking organic matter decomposition, chemistry, an aggregate dynamics. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLET, R. F.; STEWART, B. **Soil process and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p. 245-266.

GOVAERTS, B.; MEZZALAMA, M; UNNO, Y; SAYRE, K.D.; LUNA-GUIDO, M.; VANHERCK, K.; DENDOOVEN, L.; DECKERS, J. Influence of tillage, residue management, and crop rotation on soil microbial biomass and catabolic diversity. **Applied Soil Ecology**, v. 37, p. 18-30, 2007.

GRIGAL, D.F. Effects of extensive forest management on soil productivity. For. **Ecol. Manage.**, v.138, p.167–185, 2000.

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, F. B.; SILVA, A. P da. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. **Soil & Tillage Research**, v.127, p. 92-99, 2013.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil Tillage and Research**, v.82, p.121–145, 2005.

HOK, L.; SÁ, J. C. de M.; REYES, M.; BOULAKIA, S.; TIVET, F.; LENG, V.; FONG, R.; BRIEDI, C.; HARTMAN, D. da C.; FERREIRA, L. A.; INAGAKI, T. M; GONÇALVES, D. R. P.; BRESSAN, P. T. Enzymes and C pools as indicators of C build up in short-term conservation agriculture in a savanna ecosystem in Cambodia. **Soil and Tillage Research**, v. 177, p. 125–133, 2018.

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction process and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil and Tillage Research**, v. 35, p. 23–36, 1995.

HORN, R.; VAN DEN AKKER; J.J. H.; ARVIDSON, J. (Eds.). **Subsoil Compaction–Distribution, Processes and Consequences**. Advances in GeoEcology 32. Catena Verlag, Reiskirchen, 2000, 462 pp.

HU, S. J.; VAN BRUGGEN, A. H. C.; GRÜNWALD, N. J. Dynamics of bacterial populations in relation to carbon availability in a residue-amended soil. **Applied Soil Ecology**, v. 13, p. 21–30, 1999.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BRANDÃO-JUNIOR, O.; KASCHUK, G.; SOUZA, R. A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, v. 42, p. 288–296, 2009.

INSAN, H. A new set of substrates proposed for community characterization in environmental samples. In: Insan, H., Rangger, A. (Ed.) **Microbial communities**. Berlin: Springer, 1997. p.259-260.

IZQUIERDO, I.; CARAVACA, F.; ALGUACIL, M.M.; HERNÁNDEZ, G.; ROLDÁN, A. Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining area under subtropical conditions, **Applied Soil Ecology**, v.30, p.3-10, 2005.

JAHNEL, M. C.; CARDOSO, E. J. B. N.; DIAS, C. T. S. Determinação do número mais provável de microrganismos do solo pelo método de plaqueamento por gotas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.553–559, 1999.

JENSEN, L. S.; MCQUEEN, D. J.; SHEPHERD, T.G. Effects of soil compaction on N mineralization and microbial-C and -N. 1.Field measurements. **Soil & Tillage Research**, v. 38, p. 175–188, 1996.

JIN, H.; HONGWEN, L.; RASAILY, R.G.; QINGJIE, W.; GUOHUA, C.; YANBO, S.; XIAODONG, Q.; LIJIN, L. Soil properties and crop yields after 11 years of no tillage farming in wheat–maize cropping system in North China Plain. **Soil and Tillage Research**. v. 113, p. 48–54, 2011.

KASCHUK, G., ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 1–13, 2010.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 221-227, 2007.

KUWANO, B. H.; KNOB, A.; FAGOTTI, D. S. L.; MELÉM JUNIOR, N. J.; GODOY, L.; DIEHL, R. C.; KRAWULSKI, C. C.; ANDRADE FILHO, G.; ZANGARO FILHO, W.; TAVARES-FILHO, J.; NOGUEIRA, M. A. Soil quality indicators in a Rhodick and

iudult under different uses in Northern Parana, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 50-59, 2014.

LAL, R. Constraints to adopting no-till farming in developing countries. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, n. 1–3, 2007.

LI, Q.; ALLEN, H. L.; WILSON, C.A. Nitrogen mineralization dynamics following the establishment of a loblolly pine plantation. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 33 p,364–374, 2003.

LINDSTRÖM, J. E.; BARRY, R. P.; BRADDOCK, J. F. Microbial community analysis: a kinetic approach to constructing potential C source utilization patterns. **Soil Biology and Biochemistry**, v.30, p.231–239, 1998.

LIPIEC, J.; ARVIDSSON, J.; MURER, E. Review of modeling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1-2, p. 145-170, 2003.

LISBOA, B.B.; VARGAS, L.K.; SILVEIRA, A.O.; MARTINS, A.F.; SELBACH, P.A. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.45-55, 2012.

LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B.; GOEDERT, W. J.; MENDES, I. C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, p. 461-472, 2013.

LOPES, M. M.; SALVIANO, A. A. C.; ARAUJO, A. S. F.; NUNES, L. A. P. L.; OLIVEIRA, M. E. Changes in soil microbial biomass and activity in different Brazilian pastures. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 8, n. 4, p. 1253-1259, 2010.

LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G. de; REIS JUNIOR, F. B. dos; FIGUEIREDO, C. C.; MALAQUIAS, J. V.; SOUZA, L. M.; MENDES, I. C. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma**, v. 12, p. 72-82, 2018.

MACDONALD, C. A.; THOMAS, N.; ROBINSON, L.; TATE, K. R.; DANDO, J.; SINGH, B. K. Physiological, biochemical and molecular responses of the soil microbial community after afforestation of pastures with *Pinus radiata*. **Soil Biology & Biochemistry**, v.41, p. 1642–1651, 2009.

MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P.; VIEIRA, L. L. Uso da terra e a qualidade microbiana de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1678-1688, 2013.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JR., F. B. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, p. 185-203, 2015.

MORAES, M. T. D.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. D. Correction of resistance to penetration by pedofunctions and a reference soil water content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1704-1713, 2012.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Critical limits of soil penetration resistance in a RhodicEutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 288-298, 2014.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; DA SILVA, V. R.; DA LUZ, F. B. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 351-362, 2016.

MORAES, M. T. **Modelagem do crescimento radicular de milho e soja sujeito a estresses hídrico e mecânico em Latossolo**. 122 f. 2017. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. da; LUZ, F. B. da. Age-hardening phenomena in an Oxisol from the subtropical region of Brazil. **Soil & Tillage Research**, n. 170, p. 27-37, 2017.

MUNKHOLM, L.J.; HECK, R.J.; DEEN, B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. **Soil and Tillage Research**, v. 127, p. 85-91, 2013.

MURPHY, C. P. **Thin section preparation of soils and sediments**. Rothamsted, A.B. Academic Publishers, 1986. 149p.

NAKATANI, A. S.; NOGUEIRA, M. A.; MARTINES, A. M.; DOS SANTOS, C. A.; BALDESIN, L. F.; MARSCHNER, P.; CARDOSO, E. J. Effects of tannery sludge application on physiological and fatty acid profiles of the soil microbial community. **Applied soil ecology**, v. 61, p. 92-99, 2012.

NDAW, S. M.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; SALES, K. R. N.; ROSADO, A. S. Relationships between bacterial diversity, microbial biomass, and litter quality in soils under different plant covers in northern Rio de Janeiro State, Brazil. **Canada Journal Microbiology**, v.55, p.1089–1095, 2009.

NEIRO, E. S.; MATA, J. DE D. V. DA; TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A.; PINTRO, J. C.; COSTA, J. M. da. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho distroférico, com rotação e sucessão de culturas, sob plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 25, p. 19-25, 2003.

NICOLOSO, R. S.; AMADO, T. J. C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M. E.; GIRARDELLO, V. C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1723-1734, 2008.

NOGUEIRA, M.A.; HUNGRIA, M. Indicadores microbiológicos da qualidade do solo. In: Embrapa Soja-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: REUNIÃO PARANAENSE DE CIÊNCIA DO SOLO, 3., Londrina. Sistemas conservacionistas de produção e sua interação com a Ciência do Solo: resumos. Londrina: IAPAR, 2013. p. 539-544., 2013.

NOGUEIRA, M. A.; MELO, W. J. Enxofre disponível para a soja e atividade de arilsulfatase em solo tratado com gesso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p.655-663, 2003.

NUNES, M.R.; PAULETTO, E.A.; DENARDIN, J.E.; FAGANELLO, A.; PINTO, L.F.S.; SCHEUNEMANN, T. Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 531–539, 2014.

OADES, J. M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, Amsterdam, v. 56, n. 1-4, p. 377-400, 1993.

O'SULLIVAN, M. F.; HENSHALL, J. K.; DICKSON, J. W.A simplified method for estimating soil compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 49, p. 325–335, 1999.

PABST, H.; KÜHNEL, A.; KUZYAKOV, Y. Effect of land-use and elevation on microbial biomass and water extractable carbon in soils of Mt. Kilimanjaro ecosystems. **Applied Soil Ecology**, v. 67, p. 10-19, 2013.

PAGLIAI, M.; MARSILI, A.; SERVADIO, P.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. **Soil and Tillage Research**, v. 73, p. 119–129, 2003.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, v. 79, p. 131–143, 2004.

PLAZA, C.; COURTIER-MURIAS, D.; FERNÁNDEZ, J. M.; POLO, A.; SIMPSON, A. J. Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: A central role for microbes and microbial by-products in C sequestration. **Soil & Tillage Research**, v.57, p.124-134, 2013.

PENGTHAMKEERATI, P.; MOTAVALLI, P.P. AND KREMER, R.J. Soil microbial activity and functional diversity changed by compaction, poultry litter and cropping in a claypan soil. **Applied Soil Ecology**, v.48, p. 71–80, 2011.

PEREIRA, A. A.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; KASCHUK, G.; CHUEIRE, L. M. O.; CAMPO, R. J.; TORRES, E. Variações qualitativas e quantitativas na microbiota do solo e na fixação biológica do nitrogênio sob diferentes manejos com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p.1397-1412, 2007.

PUTTE, A.V.; GOVERS, G.; DIELS, J.; GILLIJNS, K.; DEMUZERE, M. Assessing the effect of soil tillage on crop growth: a meta-regression analysis on European crop yields under conservation agriculture. **European Journal of Agronomy**. v. 33, p. 231–241, 2010.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1805-1816, 2008.

RICHARD, G.; COUSIN, I.; SILLON, J.F.; BRUAND, A.; GUE´RIF, J. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**, v. 52, p. 49–58, 2001.

ROSOLEM, C.A.; FOLONI, J.S.S.; TIRITAN, C.S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. **Soil Tillage and Research**, v.65, p. 109-115, 2002.

RUSER, R.; FLESSA, H.; RUSSOW, R.; SCHMIDT, G.; BUEGGER, F.; MUNCH, J.C. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, p. 263–274, 2006.

SALTON, J. C.; MIELCNIZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.11-21, 2008.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; UMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. 2013. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa. 353p.

SCHINNER, F.; von MERSE, W. Xylanase, CM-cellulase and invertase activity in soil: an improved method. **Soil Biology and Biochemistry**, v.22, p. 511-515, 1990.

SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter lability in a tropical oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density and magnetic fractionations. **Soil Science** v. 162, p. 795-807, 1997.

SHESTAK, C.J.; BUSSE, M.D., Compaction alters physical but not biological indices of soil health. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 236–246, 2005.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BORTOLUZZI, E.C. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two Brazilian Oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1097–1104, 2009.

SILVA, A.P.; BABUJIA, L.C.; FRANCHINI, J.C.; RALISCH, R.; HUNGRIA, M.; GUIMARÃES, M.F. Soil structure and its influence on microbial biomass in different soil and crop management systems. **Soil and Tillage Research**, v. 142, p. 42–53, 2014.

SILVA, A. P.; BABUJIA, L. C.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, R. A.; HUNGRIA, M. Microbial biomass under various soil-and crop-management systems in short-and long-term experiments in Brazil. **Field Crops Research**, v. 119, n. 1, p. 20-26, 2010.

SILVA, A. P.; BABUJIA, L. C.; MATSUMOTO, L. S.; GUIMARÃES, M.F.; HUNGRIA, M. Bacterial diversity under different tillage and crop rotation systems in an oxisol of southern Brazil. **The Open Agriculture Journal**, v. 7, p.40-47, 2013.

SILVA, A. S.; COLOZZI FILHO, A.; NAKATANI, A. S.; ALVES, S. J.; ANDRADE, D. S.; GUIMARÃES, M. F. Microbial characteristics of soils under an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 40-48, 2015.

SILVA, D. A. da; SOUZA, L. C. F. de; VITORINO, A. C. T.; GONÇALVES, M. C. Aporte de fitomassa pelas sucessões de culturas e sua influência em atributos físicos do solo no sistema plantio direto. **Bragantia**, v. 70, p. 147-156, 2011.

SILVA, P. R. A. **Mecanismos sulcadores de semeadora-adubadora na cultura do milho (*Zeamays* L.) no sistema de plantio direto**. 2003. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2003.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, R. H. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37. n. 6, p. 855-860, 2002.

SILVA, S. R. **Efeitos da compactação sobre características físicas, químicas e microbiológicas de dois Latossolos e no crescimento do eucalipto**. 97 f. 2005. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

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

SKJEMSTAD, J. O.; SWIFT, R. S.; MCGOWAN, J. A. Comparison of the particulate organic carbon and permanganate oxidation methods for estimating labile soil organic carbon. **Australian Journal of Soil Research**, v. 44, p. 255-263, 2006.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, v. 16, p. 179-201, 1990.

SOUZA, E.D.; COSTA, S.E.V.G.A.; ANGHINONI, I.; LIMA, C.V.S.; CARVALHO, P.C.F.; MARTINS, A.P. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 79-88, 2010.

SOUZA, L. M.; SCHLEMMER, F.; ALENCAR, P. M.; LOPES, A. A. C.; PASSOS, S. R.; XAVIER, G. R.; FERNANDES, M. F.; MENDES, I. C.; REIS JUNIOR, F. B. Estrutura metabólica e genética de comunidades bacterianas em solo de cerrado

sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 2, p. 269-276, 2012.

SPOSITO, G.; ZABEL, A. The assessment of soil quality. **Geoderma**, Amsterdam, v.114, n. 3/4, p. 143-144, 2003.

SPENCER, B. Studies on sulphatases: 20. Enzymic leav age of arylhydrogen sulphates in the presence of H₂¹⁸O. *Biochemistry Journal*, v. 69, p.155–159, 1958.

STABEN, M. L.; BEZDICEK, D. F.; FAUCI, M. F.; SMITH, J. L. Assessment of soil quality in conservation reserve program and wheat-fallow soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, n.1, p.124-130, 1997.

STATSOFT, Inc. Electronic statistics textbook. Tulsa, OK: StatSoft, 2013. Disponível em: <<http://www.statsoft.com/textbook>>. Acesso em: 20 jan. 2018.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Use of p-nitrofenol phosphate for assay of soil phosphatase activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v.1, p.301-307, 1969.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 34, p. 225-229, 1970.

TARAWALLY, M. A.; MEDINA, H.; FRÓMETA, M. E.; ITZA, C. A. Field compaction at different soil-water status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Western Cuba. **Soil and Tillage Research**, v. 76, p. 95-103, 2004.

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M.F.; MEDINA, C.C.; BALBINO, L.C.; NEVES, C.S.V.J. Método do perfil cultural para avaliações do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 393-399, 1999.

TAVARES FILHO, J.; FONSECA, I. C. B.; RIBON, A. A.; BARBOSA, G. M. C. Efeito da escarificação na condutividade hidráulica saturada de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 996-999, 2006.

Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil 2014. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 265 p. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 16)

TIVET, F.; SÁ, J. C. D.M.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; BORSZOWSKI, P. R.; SANTOS, J.B. dos; FARIAS, A.; EURICH, G.; CRUZ HARTMAN, D. da; JUNIOR, M. N. Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 126, p. 203-218, 2013.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: EMBRAPA Soja, 1999. 58 p. (EMBRAPA Soja, Circular Técnica, 23).

TUBEILEH, A.; GROLEAU-RENAUD, V.; PLANTUREUX, S.; GUCKERT, A. Effect of soil compaction on photosynthesis and carbon partitioning within a maize–soil system. **Soil and Tillage Research**, v. 71, p. 151-161, 2003.

TURCO, R.F.; KENNEDY, A.C.; JAWSON, M.D. Microbial indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p. 73-90. (SSSA Special Publication, 35).

UNGER, P. W.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, Set./Out., p. 759-766, 1994.

VANCE, E.D.; BROOKES, P.C.; JENKINSON, D.S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v.19, p.703-707, 1987.

VASCONCELLOS, R. L. F.; ANDREOTE, F. D.; MENDES, L. W.; BARETTA, D.; CARDOSO, E. J. B. N. Microbiological indicators of soil quality in a riparian forest recovery gradient. *Ecological Engineering*, v. 53, P. 313-320, 2013.

VEIGA, M.; REINERT, D.J. E REICHERT, J.M. Aggregate stability as affected by short and long-term tillage systems and nutrient sources of a Hapludox in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p. 767-777, 2009.

VEIGA, M. D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Aggregate stability as affected by short and long-term tillage systems and nutrient sources of a hapludox in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 767-777, 2009.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1-2, p. 104-113, 2007.

XU, X.; NIEBER, J. L.; GUPTA, S. C. Compaction effects on the gas diffusion coefficients in soil. **Soil Science Society of American Journal**, v. 56, p. 1743-1750, 1992.

WEAVER, R. W.; AUGLE, S.; BOTTOMLY, P. J.; BEZDICEK, D.; SMITH, S.; TABATABAI, A.; WOLLUM, A. Methods of soil analysis. Part. 2. **Microbiological and biochemical properties**. Soil Science Society of America, Madison, p.775-833, 1994.

WHALLEY, W. R.; DUMITRU, E.; DEXTER, A. R. Biological effects of soil compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 35, p. 53-68, 1995.

WATANABE, R.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, M. de F.; TAVARES-FILHO, J.; RALISCH, R.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H. Is structural quality as assessed by the "profil cultural" method related to quantitative indicators of soil physical quality? **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, n. 2, 2018.

WOHLENBERG, E. V.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 891-900, 2004.

ZAK, J. C.; WILLIG, M. R.; MOORHEAD, D. L.; WILDMAN, H. G. Functional diversity of microbial communities: a quantitative approach. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 26, n. 9, p. 1101-1108, 1994.

ZHANG, H.; DING, W.; HE, X.; YU, H.; FAN, J.; LIU, D. Influence of 20-year organic and inorganic fertilization on organic carbon accumulation and microbial community structure of aggregates in an intensively cultivated sandy loam soil. **PLoS One**, v. 9, p. 1-11, 2014.

ZHANG, X.; XINA, X.; ZHU, A.; YANG, W.; ZHANG, J.; DING, S. Linking macroaggregation to soil microbial community and organic carbon accumulation under different tillage and residue managements. **Soil and Tillage Research**, v. 178, p. 99-107, 2018.

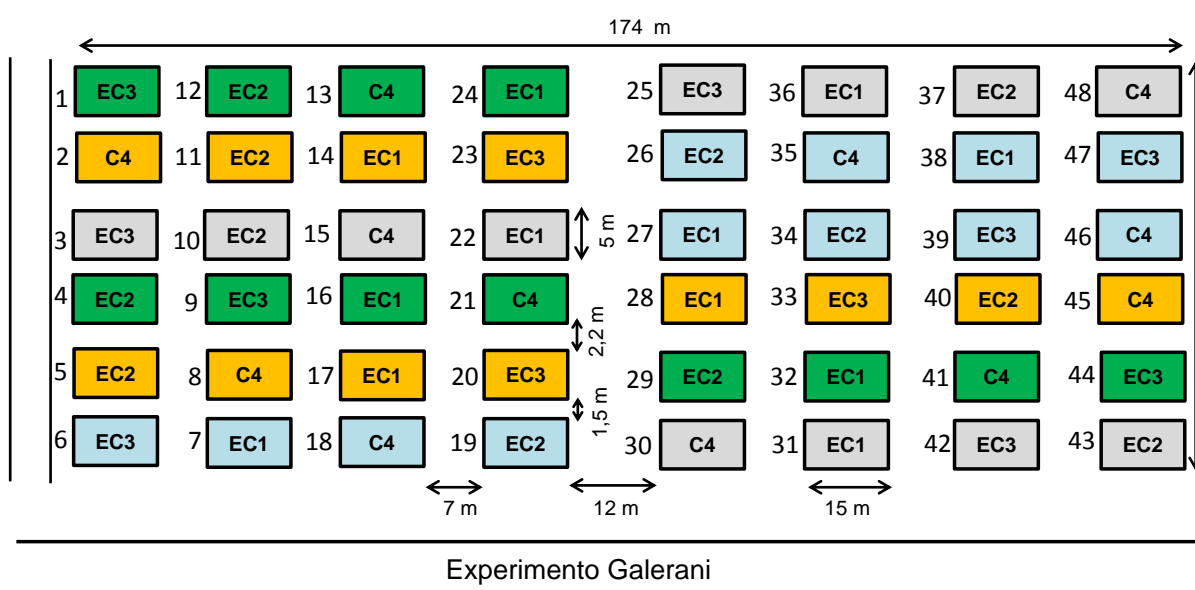
ZILLI, J. E.; RUMJANEK, N. G.; XAVIER, G. R.; COUTINHO, H. L. C.; NEVES, M. C. P. Diversidade microbiana como indicador de qualidade do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 20, p. 391-411, 2003.

ZORNOZA, R.; MATAIX-SOLERA, J.; GUERRERO, C.; ARCENEGUI, V.; MATAIX-BENEYTO, J.; GÓMEZ, I. Validating the effectiveness and sensitivity of two soil quality indices based on natural Forest soils under Mediterranean conditions. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 40, p.2079–2087, 2008.

ZORNOZA, R.; ACOSTA, A.; BASTIDA, F.; DOMÍNGUEZ, S. G.; TOLEDO, D. M.; FAZ, A. Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. **The Soil**, v. 1, p. 173–185, 2015.

ANEXOS

ANEXO A - Croqui do experimento realizado em Londrina-PR, em um LATOSSOLO Vermelho distroférico, instalado em 2013 sob sistema plantio direto, com delineamento experimental de blocos ao acaso com três repetições, em parcelas subdivididas, compreendendo quatro culturas de outono-inverno nas parcelas e três estados de compactação (EC) do solo nas subparcelas.



➤ Parcelas:

- Milho 2º safra;
- Braquiária ruziziensis;
- Aveia preta;
- Trigo.

➤ Subparcelas:

- EC1 – escarificado em 2013;
- EC2 – sem compactação/sem escarificação;
- EC3 – compactado com 8 passadas colhedora em 2013;

*C4 – não foi incluído neste estudo.

ANEXO B - Fontes de carbono contidas nas microplacas Biolog Ecoplate (Biolog Inc., Hayward, Califórnia) e os grupos funcionais a que pertencem de acordo com Insan (1997).

Grupos funcionais	Fontes de carbono
Polímeros	Tween 40 Tween 80 α -Ciclodextrina Glicogênio
Ácido carboxílico	Ácido D-Galacturônico Ácido γ -Hidroxi-butírico Ácido D-Glicosamínico Ácido Itacônico Ácido α -Cetobutírico Ácido D-Málico Éster Metílico do Ácido Pirúvico
Fenólico	Ácido 2-Hidroxi-benzóico Ácido 4-Hidroxi-benzóico
Carboidrato	Ácido D-Galacturônico γ -Lactona β -Metil-D-Glicosídeo D-Xilose i-Eritritol D- Manitol N-Acetil-D-Glicosamina D-Celobiose α -D-Lactose
Aminoácido	L-Arginina L-Asparagina L-Fenilalanina

Continua...

ANEXO B – (Continuação)

	L-Serina
	L-Treonina
	Ácido Glicil-L-glutâmico
Amina / Amida	
	Feniletilanina
	Putrescina
Miscelânea	
	Glicose-1-fosfato
	D,L- α -Glicerol fosfato
