

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLOGIA
MESTRADO EM AGRONOMIA

DANIEL RUIZ POTMA GONÇALVES

ESPACIALIZAÇÃO DO CARBONO E SUAS RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE
DE CULTURAS EM SOLOS SOB PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO

PONTA GROSSA - PR

2014

DANIEL RUIZ POTMA GONÇALVES

ESPACIALIZAÇÃO DO CARBONO E SUAS RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE
DE CULTURAS EM SOLOS SOB PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de
Ponta Grossa para a obtenção do título de Mestre em
Agronomia - Área de Concentração em Agricultura.
Ênfase em Uso e Manejo do Solo.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos de Moraes Sá.

PONTA GROSSA - PR

2014

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

G635 Gonçalves, Daniel Ruiz Potma
Espacialização do carbono e suas
relações com a produtividade de culturas
em solos sob plantio direto de longa
duração/ Daniel Ruiz Potma Gonçalves.
Ponta Grossa, 2014.
73f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia -
Área de Concentração: Agricultura),
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Orientador: Prof. Dr. João Carlos de
Moraes Sá.

1.Variação espacial de carbono.
2.Carbono orgânico total. 3.Produtividade
de soja. 4.Produtividade de milho.
5.Produtividade de trigo. I.Sá, João
Carlos de Moraes. II. Universidade
Estadual de Ponta Grossa. Mestrado em
Agronomia. III. T.

CDD: 631.8



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: **“Espacialização do carbono e suas relações com a produtividade de culturas em solos sob plantio direto de longa duração”.**

Nome: Daniel Ruiz Potma Gonçalves

Orientador: João Carlos de Moras Sá

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. João Carlos de Moras Sá

Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado

Data da Realização: 23 de julho de 2014.

DEDICO

A minha família, por serem meus primeiros e eternos professores.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha família pelo exemplo e apoio nas horas difíceis.

Ao Professor Juca pela orientação, compreensão, estímulo e amizade.

Ao Grupo Miranda em especial ao Eng. Agr. Allison Fornari por todo o apoio prestado e pela amizade.

A toda equipe do LABMOS, em especial aos acadêmicos Alex Cosmos, Cainã Mallmann, Rafael Shemiguel, Tomas Magno e ao estudante de doutorado Lyda Hok pela ajuda na grande tarefa da amostragem. A Jaqueline Gonçalves pelos ensinamentos e pelo apoio incondicional.

Ao técnico Romeu pela ajuda no preparo das amostras. Às acadêmicas Flávia Furlan e Lucimara Aparecida pelo ótimo trabalho que realizaram no projeto. Aos amigos Clever Briedis, Jucimare Romaniw e Ademir Oliveira pelo incentivo, apoio e pelas ótimas risadas.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa e ao Programa de Pós Graduação em Agronomia pela confiança depositada em mim e pela dedicação com que sempre realizam seus trabalhos.

Aos membros da banca examinadora, Professor Eduardo Caires e Professor Telmo Amado pela disposição.

A todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

GONÇALVES, Daniel Ruiz Potma. **Espacialização do carbono e suas relações com a produtividade de culturas em solos sob plantio direto de longa duração**. 2014. Dissertação de Mestrado em Agronomia – Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

Resumo: O C orgânico total (COT) do solo exerce influência sobre suas propriedades químicas, físicas e biológicas, sendo assim, importante para a manutenção da fertilidade principalmente de solos tropicais. Porém, embora os benefícios do acúmulo de COT sobre a qualidade do solo sejam bem conhecidos, ainda são escassas informações referentes aos seus efeitos sobre a produtividade de culturas. Os objetivos deste estudo foram mapear os compartimentos de COT em uma fazenda manejada há 30 anos no sistema plantio direto, verificar quais são as variáveis do solo que interferem na variação espacial do COT e analisar as relações entre os compartimentos do COT e a produtividade das culturas da soja, milho e trigo. Foram coletadas amostras deformadas em todas as principais classes de solos da fazenda em todas as posições da paisagem. Foram analisados o COT, o C oxidado por permanganato (C-OXP) e o C extraído por água quente (C-EAQ) e gerados mapas com a variação espacial destas variáveis. Os efeitos dos atributos do solo sobre o acúmulo de COT e dos compartimentos de COT sobre as produtividades da soja, milho e trigo foram acessados através de regressões e análises de componentes principais. Visando acessar a contribuição do COT para as produtividades das culturas foram ajustadas regressões múltiplas com as variáveis do solo e as produtividades. O maior conteúdo de argila e a maior adição de fitomassa nos Latossolos e a formação de um ambiente anaeróbico nos Cambissolos foram os principais fatores que explicaram os maiores conteúdos de COT observados nos terços superior dos Latossolos e inferior dos Cambissolos. As produtividades de trigo e soja apresentaram correlação positiva com o COT e o N total (NT) e a produtividade de milho apresentou correlação positiva com o C-EAQ. As variáveis NT e COT foram as que mais contribuíram para explicar a variação da produtividade de trigo.

Palavras Chave: Variação espacial de carbono; carbono orgânico total; produtividade de soja; produtividade de milho; produtividade de trigo.

Spatialization of carbon and its relationship with crop yields in soils under long-term no-tillage

Abstract: The total organic C (TOC) of the soil influences their chemical, physical and biological properties, therefore, it's important for the maintenance of soil fertility mainly of tropical soils. But, while the benefits of TOC accumulation on soil quality are well known, there is still little information about its effects on crop yields. The aims of this work were to map the compartments of the TOC on a farm managed for 30 years in no-till system, determine which soil variables that influence the spatial variation of TOC and analyze the relationships between the compartments of TOC and crop yields of soybean, corn and wheat. Deformed samples were collected in all soil classes and all landscape positions in the farm. Were analyzed the TOC, the permanganate oxidized C (POX-C) and the hot water extracted C (HWE-C) and were generated maps with the spatial variation of these variables. The effects of soil properties on the accumulation of TOC and the effect of TOC compartments on yields of soybean, corn and wheat were accessed through regressions and principal component analysis. Aiming to access the contribution of TOC to the crop yields, multiple regressions with the soil variables and yields were adjusted. The higher clay content and the largest biomass apport in Oxisols and the formation of an anaerobic environment in Inceptisols were the main factors that explained the highest contents of TOC observed in the upper thirds of the Oxisols and lower thirds of the Inceptisols. Yields of wheat and soybean showed positive correlation with TOC and total N (TN) and corn yield was positively correlated with HWE-C. The TN and TOC were the variables that contributed most to explain the variations in the wheat yield.

Key Words: Soil carbon spacialization; total organic carbon; soybean yield; corn yield, wheat yield.

Lista de Siglas

ACP	Análise de Componentes Principais
C-EAQ	Carbono Extraído por Água Quente
CEC	Cation Exchange Capacity
CH	Cambissolo Húmico
CH+RL	Cambissolo Húmico + Neossolo Quartzarênico
CMI	Carbon Management Index
COE	Carbono Orgânico Estável
COL	Carbono Orgânico Lábil
COP	Carbono Orgânico Particulado
COT	Carbono Orgânico Total
C-OMP	Carbono Oxidado por Permanganato
CP1/2	Componente Principal 1/2
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
CTC efet	Capacidade de Troca de Cátions Efetiva
CX	Cambissolo Háplico
DP	Diretamente Proporcional
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization
IAPAR	Instituto Agrônômico do Paraná
IP	Inversamente Proporcional
IQS	Índice de Qualidade do Solo
IMC	Índice de Manejo de Carbono
IRS	Índice de Resiliência do Solo
HWE-C	Hot Water Extracted Carbon
LABMOS	Laboratório de Matéria Orgânica do Solo
LV	Latossolo Vermelho
LVA	Latossolo Vermelho Amarelo
MO	Matéria Orgânica
MOS	Matéria Orgânica do Solo
MSU	Michigan State University
NT	Nitrogênio Total
PCA	Principal Component Analysis
POX-C	Permanganate Oxidized Carbon
ppm	Parte por Milhão
RCP	Regressão com Componentes Principais
RE	Relação de Estratificação
RPM	Rotações por Minuto
SB	Soma de Bases
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SPD	Sistema Plantio Direto
SRI	Soil Resilience Index
S1/S2/S3	Sucessão 1/2/3
TN	Total Nitrogen
TOC	Total Organic Carbon
USDA	United States Department of Agriculture

Lista de Figuras

Figura 1: Contribuição dos compartimentos de COT para o COT, adaptado de Sá et al., (2008).	17
Figura 2: Esquema demonstrando como são realizados estudos em escala de paisagem, adaptado de Palm et al. (2007).	19
Figura 3: Fluxograma com os efeitos de diversas variáveis na produtividade de culturas.	20
Figura 4: Localização da área de estudo - Fazenda Paiquerê em Pirai do Sul, PR.	28
Figura 5: Precipitação pluvial mensal na Fazenda Paiquerê entre os anos 1986 e 2013.	29
Figura 6: a) Descrição do processo sucessão de culturas utilizado na fazenda. b) Estágio de sucessão de culturas na área de estudo em 2013 durante a amostragem;	30
Figura 7: Esquema de um “Benchmark”, uma unidade de amostragem, adaptado de Sá et al. (2013)a.	32
Figura 8: Representação dos locais de amostragem com as cotas de altitude e as principais classes de solo existentes na fazenda.	33
Figura 9: Mapas de colheita das culturas de trigo (2012) e milho (2011/2012).	39
Figura 10: ACP realizada com as variáveis analisadas na camada de 0-10 cm utilizando as médias calculadas por classe de solo.	42
Figura 11: Espacialização das variáveis analisadas ajustadas por modelos “spline”	46
Figura 12: ACP realizada com as variáveis analisadas e a produtividade de soja.	56
Figura 13: ACP realizada com as variáveis analisadas e a produtividade de trigo.	57
Figura 14: ACP realizada com as variáveis analisadas e a produtividade de milho.	58
Figura 15: Regressão ajustada entre a produtividade de trigo padronizada (kg/ha) e o Componente Principal 1.	60

Lista de Tabelas

Tabela 1: Alguns trabalhos recentes que acessaram a relação entre variáveis do solo e a produtividade de culturas.	22
Tabela 2: Efeito do acúmulo de COT sobre variáveis que influenciam a produtividade de culturas.	24
Tabela 3: Médias históricas de produtividade de grãos e aporte de C proveniente das raízes, da parte aérea e total das culturas.	30
Tabela 4: Média do conteúdo de C orgânico total (COT), C nos compartimentos lábeis, N total (NT) e a relação C/N por classe de solo e posição na paisagem.....	37
Tabela 5: Médias do conteúdo de argila, silte e areia na profundidade de 0-20 cm, calculadas por classe de solo e posição na paisagem.	38
Tabela 7: Relações de estratificação entre as camadas de 0-10 cm e 20-40 cm para as variáveis: concentração de COT e do C presente nos compartimentos lábeis, concentração de N e relação C/N do solo por classe de solo..	43
Tabela 8: Concentrações totais de COT e de C presente nos compartimentos lábeis, concentração de N e relação C/N do solo por profundidade amostrada e período que a área se encontra dentro da escala de sucessão de culturas.	44
Tabela 9: Coeficientes de correlação de Pearson entre os índices calculados, os compartimentos de COT e as produtividades de trigo, milho e soja.....	54
Tabela 10: Modelo de regressão múltipla com os três primeiros componentes principais, considerando as variáveis mensuradas e obtidas da base de dados da Fazenda Paiquerê como preditoras da produtividade padronizada de trigo.	60

Sumário

1.	Apresentação	12
2.	Introdução	13
3.	Revisão bibliográfica.....	14
3.1	Acúmulo de carbono afetado por sistemas de manejo do solo	14
3.2	Compartimentos do carbono orgânico total	16
3.3	Índices utilizados no estudo do Carbono Orgânico Total	18
3.4	Estudos em escala espacial	18
3.5	Produtividade de culturas e o carbono orgânico total	20
4.	Capítulo 1: Espacialização dos compartimentos de carbono orgânico do solo em escala da paisagem sob sistema plantio direto de longa duração	25
5.	Introdução	26
6.	Material e métodos	27
6.1	Localização e descrição da área de estudo.....	27
6.2	Procedimento de amostragem do solo	31
6.3	Preparo das amostras	33
6.4	Análises realizadas	34
6.5	Carbono lábil extraído por água quente (C-EAQ)	34
6.5.2	Carbono Oxidado por Permanganato (C-OXP).....	34
6.5.3	Carbono Orgânico Total (COT) e Nitrogênio total (NT)	34
6.6	Análises estatísticas	35
7.	Resultados e Discussão	36
7.1	Compartimentos de Carbono orgânico Total por classe de solo e posição na paisagem ...	36
7.2	Compartimentos de C e N nas classes de solo.....	41
7.3	Estratificação dos compartimentos de COT	43

7.4	Efeito da sucessão de culturas	43
7.5	Mapas dos compartimentos de COT	45
8.	Conclusões	46
9.	Capítulo 2: Relações entre os compartimentos de carbono orgânico do solo e a produtividade de culturas no sistema plantio direto de longa duração	47
10.	Introdução	49
11.	Material e métodos.....	50
11.1	Base de dados da Fazenda Paiquerê	51
11.2	Índices calculados.....	51
11.3	Análises estatísticas	52
12.	Resultados e Discussão	54
12.1	Correlações entre os compartimentos de COT e a produtividade das culturas	54
12.2	Análises de componentes principais	55
12.3	Modelagem do efeito do solo na produtividade de culturas	59
13.	Conclusão	62
14.	Conclusões gerais	63
15.	Referências bibliográficas.....	64

1. Apresentação

Esta dissertação foi redigida “em forma de publicação”, conforme o Manual de Normalização Bibliográfica para Trabalhos Científicos da UEPG e é composta pelos seguintes trabalhos científicos:

- **Espacialização dos compartimentos de carbono orgânico do solo em escala da paisagem sob sistema plantio direto de longa duração.**
- **Relações entre os compartimentos de carbono orgânico do solo e a produtividade de culturas no sistema plantio direto de longa duração.**

Antecedendo os trabalhos citados encontram-se uma Introdução e uma Revisão de literatura de caráter geral. O último capítulo é constituído pelas conclusões gerais.

2. Introdução

A dinâmica do carbono orgânico em sistemas de manejo do solo e seu impacto no meio ambiente vêm tendo destaque na comunidade científica nas últimas três décadas. Recentemente, a concentração de CO₂ atmosférico superou a marca de 400 ppm (NOAA, 2013), estimulando ainda mais as linhas de pesquisa sobre a emissão de gases do efeito estufa e o potencial dos sistemas de manejo conservacionista em mitigar esses gases (COSTA et al., 2008; CERRI et al., 2010) e promover o sequestro de carbono (C) (LAL, 2004a; LAL, 2008; SÁ et al., 2013a).

Além da importância do sequestro de C há também o efeito crucial na formação e manutenção da qualidade do solo para o desenvolvimento de uma agricultura mais sustentável (LAL, 2004a). Embora seja bem conhecido o seu papel nos atributos físicos (PAGLIAI et al., 2004), químicos (SÁ e LAL, 2009) e biológicos (SIX et al., 2006), o efeito do acúmulo de C sobre a produtividade das culturas ainda gera inúmeras discussões. Em algumas situações são reportados resultados controversos devido a grande quantidade de variáveis envolvidas. A influência do clima, do relevo, do material genético, a interferência de doenças e pragas têm peso determinante em cada região e a generalização do efeito do C na produção das culturas é muitas vezes equivocado (OGLE et al., 2012). Dessa maneira é necessário realizar estudos procurando entender as características de cada região. Mesmo trabalhando em escalas regionais, a grande quantidade de variáveis que devem ser consideradas nestes estudos exige a organização de bancos de dados com elevado nível de detalhe sobre as variáveis envolvidas. Algumas alternativas para este problema surgiram a partir da década dos 80, com o desenvolvimento de sistemas de informação geográfica (SIG) (SILVA, 2003). Esta ferramenta possibilita modelar as diversas situações da paisagem em escala espacial, associadas a bancos de dados georreferenciados. A utilização dos SIGs em estudos sobre a dinâmica do C no solo permitiu um avanço expressivo na compreensão e na abrangência dos efeitos do C em escala global (MISHRA et al., 2010; WANG et al., 2010; LI et al., 2013a).

O presente estudo foi concebido com base na hipótese de que os compartimentos de C interferem na produtividade das culturas devido à relação com atributos físicos, químicos e biológicos. Assim, os objetivos deste trabalho foram: a) gerar mapas sobre a distribuição de carbono orgânico total (COT) e de seus compartimentos (C-OXP; C-EAQ) em escala regional; b) identificar os atributos estudados que apresentam maior contribuição para a

expressão da produção dos cultivos de milho (*Zea mays* L.), soja (*Glycine max* L.) e trigo (*Triticum aestivum* L.). Espera-se com os resultados obtidos, proporcionar avanços no entendimento das relações entre o COT e a produtividade de culturas para dar suporte na elaboração de estratégias agronômicas e consolidar as bases de uma agricultura mais sustentável.

3. Revisão bibliográfica

3.1 ACÚMULO DE CARBONO AFETADO POR SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO

A matéria orgânica do solo (MOS) é o resultado da decomposição dos resíduos vegetais e animais e pode ser dividida em dois grandes reservatórios – o ativo e o estável (STEVENSON, 1986). O primeiro é constituído pela biomassa microbiana, a fração leve ou facilmente oxidável, os rizodepósitos e as substâncias não húmicas, tais como os açúcares, proteínas, gorduras, celulose, hemicelulose, provenientes da adição recente de matéria orgânica (MO) ao solo. O segundo compreende as substâncias húmicas, ácidos fúlvicos, húmicos e huminas, provenientes das transformações que a MO sofre com o passar do tempo. Estas transformações são caracterizadas pela reação de compostos aminados sintetizados por micro-organismos com ligninas modificadas, quinonas e açúcares, formando complexos escuros (SCHNITZER, 1978).

A conversão de áreas com vegetação nativa em áreas agrícolas por meio da retirada e da queima da vegetação, aliada à adoção de práticas de revolvimento do solo, resultam em expressiva diminuição do conteúdo de MOS (SÁ et al., 2013b). O principal motivo é a ruptura dos agregados e a exposição do C protegido intra-agregado à ação da microbiota, promovendo a sua oxidação e a liberação de CO₂, contribuindo para o efeito estufa como resultado final da reação (LAL, 2004b). Sistemas conservacionistas de manejo como o sistema plantio direto (SPD) são eficientes em promover o acúmulo de COT, em decorrência do aporte e da manutenção de material orgânico na superfície do solo, visando a redução da oxidação da MOS e proteção dos agregados (SÁ et al., 2001; TIVET et al., 2013).

O aumento no conteúdo do C pode inclusive superar o conteúdo inicial encontrado na vegetação nativa, dependendo da quantidade, qualidade e da frequência da adição de resíduos

culturais (SÁ et al., 2001; CERRI et al., 2008; SÁ et al., 2013b). O acúmulo de C nas camadas superficiais, com o passar do tempo, vai gerando no perfil do solo o processo de estratificação (FRANZLUEBBERS et al., 2002; SÁ e LAL, 2009; FERREIRA et al., 2013). A relação de estratificação pode ser utilizada como um atributo para testar a qualidade do sistema de manejo. Sá e Lal, (2009) relataram um aumento na relação de estratificação de COT entre as camadas 0-5 e 20-40 cm com o tempo de adoção do SPD e uma relação positiva ($R^2 = 0,79$; $p = 0,011$) com o carbono orgânico dissolvido.

A distribuição do C oriundo dos resíduos culturais nos agregados do solo é governada por vários processos. Os ciclos de umedecimento e secagem e a ação da mesofauna promovem a primeira fase, fragmentando os resíduos em partes cada vez menores e tornando-os acessíveis à ação da microbiota. Esta atua rompendo as estruturas das moléculas, quebrando as ligações mais fracas que as compõem (ligações simples). Ao final do seu ciclo de vida, estes micro-organismos liberam compostos carbonados (principalmente polissacarídeos) que se unem à fração argila, funcionando como agente de cimentação (agentes transientes de ligação) unindo as partículas minerais do solo para a formação de microagregados (TISDALL e OADES, 1982). Os microagregados formados continuam o processo e se unem para formar os macroagregados. Além dos compostos carbonados oriundos da biomassa microbiana, também atuam hifas de fungos, micorrizas e raízes que se caracterizam como os agentes de ligação temporários (TISDALL e OADES, 1982; SIX et al. 2002). O processo continua até a formação de várias classes de macroagregados, que irão determinar a estrutura do solo e proteção do C à oxidação.

A textura exerce papel fundamental no acúmulo de C estabilizado em função da proteção química estabelecida principalmente pelas argilas, interferindo no ataque microbiano e na oxidação do C (TISDALL e OADES, 1982; SIX et al., 2002). As argilas de solos de região temperada, como as esmectitas, podem apresentar CTC superior a $100 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ enquanto as argilas de solos de regiões tropicais, como as caulinitas, apresentam CTC que raramente ultrapassa $10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (SPARKS, 2003). A variação da mineralogia do solo também pode exercer um efeito significativo no acúmulo de COT, pois a associação de C com óxidos de Fe e Al é importante para o incremento de C e também um dos principais fatores que regulam o acúmulo de C em solos ácidos de regiões subtropicais e tropicais (KAISER e GUGGENBERGER, 2003; KLEBER et al. 2005; INDA JUNIOR et al. 2013).

A formação de ambientes anaeróbicos em locais de drenagem impedida ou profundidade efetiva baixa, também pode ocasionar grande acúmulo de COT. Isto ocorre porque a MO adicionada não é oxidada ou o é muito lentamente pela biomassa microbiana adaptada a estes ambientes (organismos anaeróbicos). Esses organismos têm como produto final do seu metabolismo o metano, que é produzido a taxas muito menores que o CO_2 (PONNAMPERUMA, 1972).

3.2 COMPARTIMENTOS DO CARBONO ORGÂNICO TOTAL

Embora o acúmulo de C no solo em agro-ecossistemas possa atingir níveis acima da vegetação nativa, há um limite de saturação no qual esse acúmulo cessa (SIX et al., 2002). A proposta sobre a divisão dos compartimentos de C no solo reportada por Six et al. (2000 e 2002) - como C quimicamente, fisicamente, bioquimicamente protegido e o não protegido - oferece uma explicação para este fenômeno. O C quimicamente protegido é aquele que permanece adsorvido às argilas, o C fisicamente protegido está interligando os agregados e inacessível à biomassa microbiana, o C bioquimicamente protegido é um componente de substâncias húmicas altamente recalcitrantes e o C não protegido é aquele que foi recentemente adicionado ao solo e está acessível para a biomassa microbiana. O solo contém uma quantidade finita de partículas minerais de argila, e uma capacidade limitada de formação de agregados. Assim, os compartimentos de C quimicamente e fisicamente protegidos tem um limite máximo de saturação. Da mesma maneira, a formação de substâncias húmicas também apresenta um limite máximo, determinado pela idade do C adicionado ao solo. Desta forma, espera-se que os estoques de COT, em áreas onde a saturação destes compartimentos já ocorreu, variem em função do estoque de C não protegido, que ao atingir uma situação de equilíbrio com a biomassa microbiana, determina o potencial de acúmulo de C deste solo.

O C muito lábil representa os polissacarídeos associados à biomassa microbiana e varia em curto prazo devido à sensibilidade da população microbiana ao manejo, à aplicação de agroquímicos, fertilizantes e à adição de MO que serve como substrato para o seu crescimento (MAZZARINO et al., 1993; GHANI et al., 2003). O C lábil é constituído principalmente por compostos orgânicos alifáticos derivados da decomposição dos restos culturais em decorrência da adição recente de material orgânico ao solo (BLAIR et al. 1995). Ele reflete a influência do COT na ciclagem de nutrientes para as plantas, pois representa

compostos carbonados que podem ser facilmente oxidados pela biomassa microbiana (SIX et al., 2002; CULMAN et al., 2012; CULMAN et al., 2013). O C muito lábil também influencia a ciclagem de nutrientes para as plantas por representar a biomassa microbiana (COOCKSON et al., 2008; LI et al., 2013b).

O C total no solo varia em longo prazo por ser constituído em grande parte por substâncias húmicas (figura 1, SÁ et al., 2008) cujo “turnover time” ou tempo de residência no solo pode atingir mais de 2000 anos (STEVENSON, 1986).

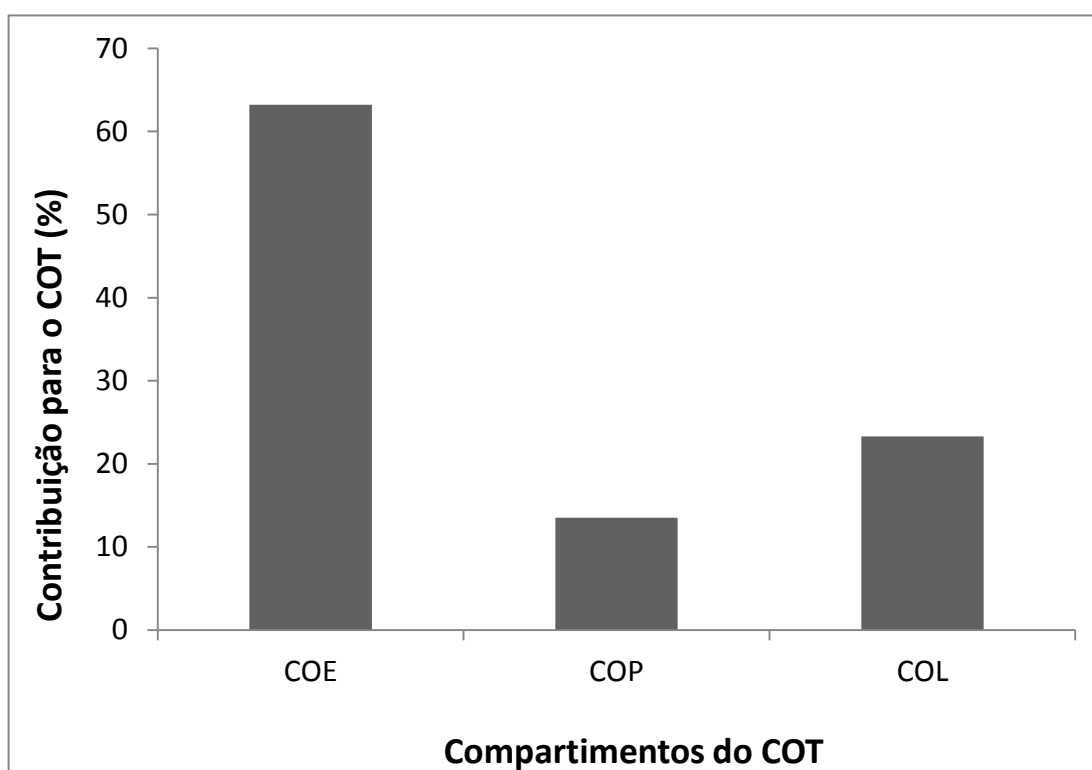


Figura 1: Contribuição dos compartimentos de COT para o COT, adaptado de Sá et al., (2008).

*COT = Carbono orgânico total; COE = Carbono orgânico estável; COP = Carbono orgânico particulado; COL = Carbono orgânico lábil

O COT reflete a influência sobre atributos físicos como a porosidade, agregação, capacidade de infiltração, transporte, retenção de água no solo e atributos químicos como a CTC e a ciclagem de nutrientes (SIX et al., 2002; SPARKS, 2003; PAGLIAI et al., 2004; SÁ et al. 2009).

3.3 ÍNDICES UTILIZADOS NO ESTUDO DO CARBONO ORGÂNICO TOTAL

A opção pela adoção de índices e/ou relações com os compartimentos do C em estudos sobre o impacto do uso e manejo dos solos tem sido uma estratégia para a interpretação de alterações espaço-temporais de atributos do solo. Precisamente, um índice procura atuar como uma síntese de uma ou mais variáveis para demonstrar que as alterações ocorridas são um reflexo desse conjunto (GIL-SOTRES et al., 2005). Há vários exemplos de índices no estudo da dinâmica do C no solo e dentre estes o índice de manejo de C (IMC), índice de labilidade do C, e o índice de resiliência do solo (IRS) têm sido muito utilizados (SILVA et al., 2014). O IMC foi proposto por Blair et al. (1995) com a finalidade de avaliar a labilidade do COT em decorrência das alterações que o uso e manejo do solo provocam nos compartimentos do C, tendo como referência a vegetação nativa. Vieira et al. (2007) reportaram que o IMC apresentou elevada correlação com atributos químicos como a CTC efetiva, físicos, como o diâmetro médio de agregados, e biológicos como a biomassa microbiana. O IRS foi proposto por Herrick e Wander, (1997) com o objetivo de determinar a eficiência de um sistema de manejo em recuperar um novo estado de equilíbrio do C do solo. Este índice considera dois níveis limítrofes: o limite inferior, representado pelo conteúdo de COT em uma área sob um sistema de manejo com preparo do solo, e o limite superior, representado pelo solo sob vegetação nativa. Esse índice foi utilizado por Conceição et al., (2014) e recentemente por Sá et al. (2013b). Estes últimos reportaram que o IRS calculado teve estreita correlação com o C acumulado e a produção das culturas.

3.4 ESTUDOS EM ESCALA ESPACIAL

Os estudos em escala espacial permitem uma visão panorâmica da paisagem, a organização de uma grande base de dados, o cruzamento de diversas variáveis e suas relações com o ambiente (Figura 2), (PALM et al. 2007). Eles foram possíveis devido ao desenvolvimento de sistemas de informação geográfica (SIGs) a partir da década de 80, juntamente com a evolução dos computadores pessoais como ferramentas para a realização de análises complexas que em situações de campo seriam praticamente inviáveis (SILVA, 2003).

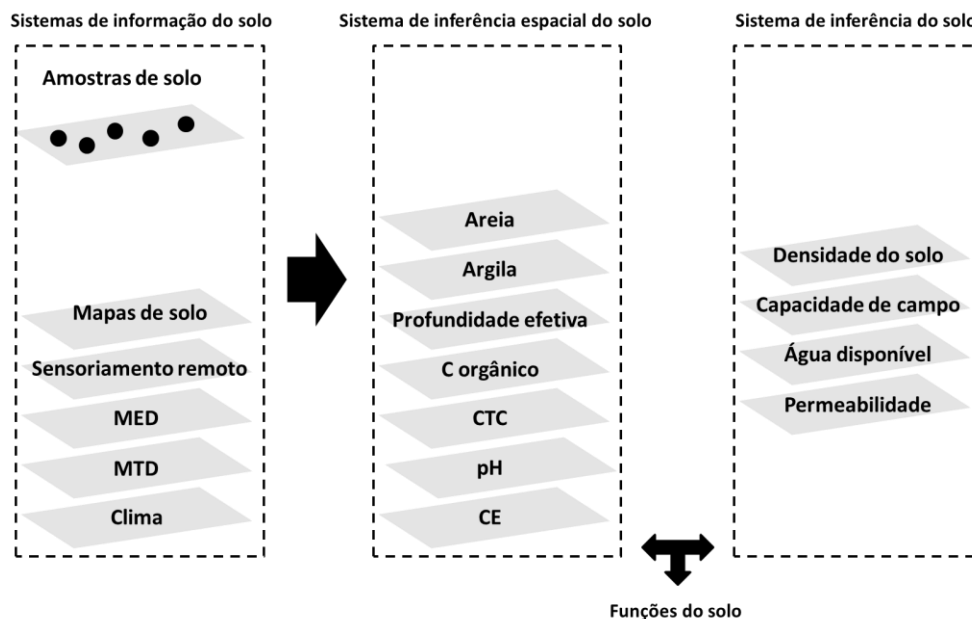


Figura 2: Esquema demonstrando como são realizados estudos em escala de paisagem, adaptado de Palm et al. (2007).

Estudos sobre a variação espacial do conteúdo de COT têm sido cada vez mais difundidos (GUO et al., 2006; DON et al., 2007; LI et al., 2013a), e podem servir de base para: (i) o planejamento e o monitoramento do manejo agrícola de fazendas (GONÇALVES et al. 2012; SANTI et al. 2012); (ii) a realização de inventários de COT (BERNOUX et al. 2002; MISHRA et al. 2012; SÁ et al. 2013a); (iii) a compreensão de como ocorre o acúmulo de COT em escala de paisagem (MISHRA et al., 2010; WANG et al., 2010) (iv) permitir a extrapolação de dados para escalas maiores (LAL, 2004a; MILNE et al. 2007); (v) verificar a eficiência dos modelos de predição do acúmulo de COT (TORNQUIST et al., 2009; BORTOLON et al., 2011); (vi) elaborar políticas agrícolas e de desenvolvimento regional (LAL, 2004a; LAL, 2008); (vii) estimar a contribuição das áreas estudadas na emissão de gases do efeito estufa (CERRI et al. 2007; LAL, 2008); (viii) elaborar políticas de pagamentos por serviços ambientais como créditos de C (AMADO et al., 2008). Os itens i, ii, iv, v e vii contêm exemplos de trabalhos realizados no Brasil, o que demonstra a importância do país no cenário mundial de pesquisas com COT.

3.5 PRODUTIVIDADE DE CULTURAS E O CARBONO ORGÂNICO TOTAL

As relações entre os atributos do solo e a produtividade de culturas apresentam várias respostas e deve-se considerar que o efeito das variáveis de solo acontece de maneira complementar às outras variáveis (Figura 3). As variáveis climáticas como a intensidade da radiação luminosa, temperatura e precipitação pluvial, aliadas às biológicas, como o material genético e a ocorrência de pragas e doenças exercem impactos diferentes no crescimento das culturas.

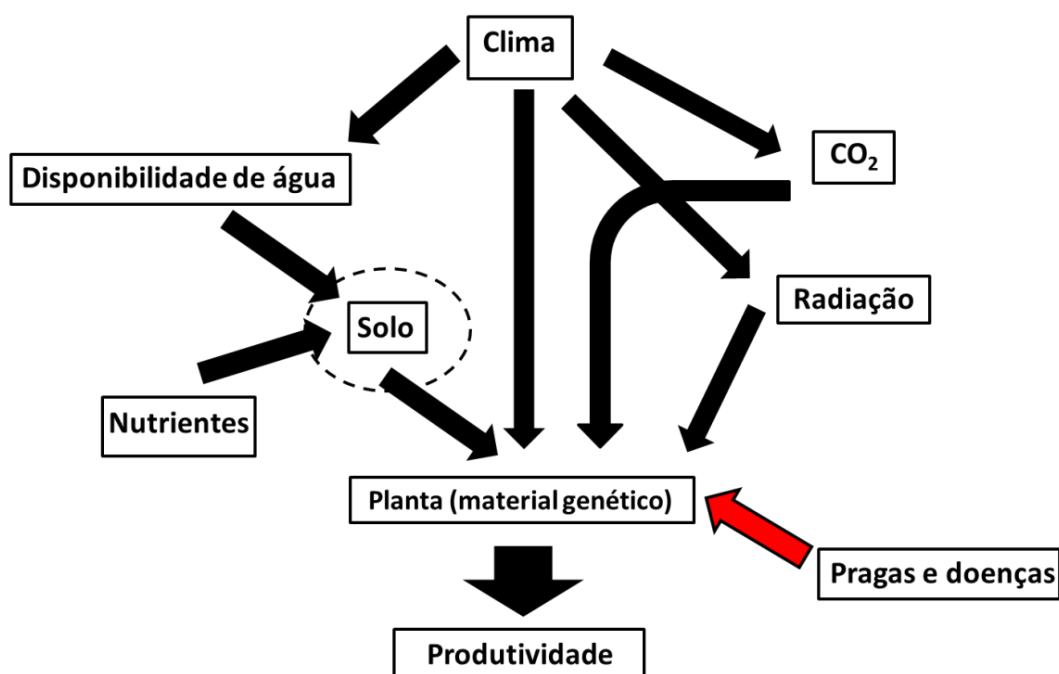


Figura 3: Fluxograma com os efeitos de diversas variáveis na produtividade de culturas.

*A flecha vermelha indica um efeito negativo.

O acesso às relações entre os atributos do solo, as variáveis climáticas e o material genético permite a melhor compreensão da produtividade das culturas (Tabela 1). Soma-se à estas informações o estudo dos sistemas de manejo (BHARDWAJ et al., 2011; FRANCHINI et al., 2012; OGLE et al., 2012). Como as variáveis de solo afetam o desenvolvimento e a produtividade de culturas de maneira a limitá-los pela variável considerada mais limitante para cada cultura, não existe, especificamente, um padrão único do efeito do solo sobre a produtividade, sendo necessário um estudo de caso para determinar as variáveis de solo mais limitantes em cada caso específico.

O acúmulo de COT exerce efeito indireto sobre a produtividade das culturas porque atua na melhoria de atributos físicos, químicos e biológicos (Tabela 2). Assim, é difícil estabelecer um perfil sobre o efeito do aumento do COT na produtividade de culturas. Recentemente, Sá et al. (2013a e 2014) demonstraram que o aumento do C no solo devido à adição de C via resíduos culturais em SPD recuperou a capacidade de resiliência do solo e promoveu maior rendimento nas culturas de soja, milho e trigo.

Tabela 1: Alguns trabalhos recentes que acessaram a relação entre variáveis do solo e a produtividade de culturas.

(Continua)

Variáveis	Relação	Método	Cultura
Físicas			
Resistência do solo à penetração	IP	Correlação espacial	<i>Triticum spp.</i>
Densidade do solo	IP	Correlação linear; Correlação espacial	<i>Brachiaria brizantha</i>
Capacidade de infiltração de água no solo	DP	ACP	<i>Zea mays; Glycine max</i>
Conteúdo de argila	DP	Regressão linear	<i>Eucalyptus spp.</i>
Químicas			
Conteúdo de N	DP	Modelagem de produtividade; Teste de LSD; Regressão linear	<i>Triticum spp.; Zea mays;</i> <i>Sorghum spp.; Amorphia fruticosa</i>
Conteúdo de K	DP	ACP	<i>Zea mays; Glycine max</i>
Conteúdo de nitrato	DP	Correlação linear; Regressão linear	<i>Zea mays</i>
Conteúdo de P	DP	Regressão linear simulação de produtividade	<i>Triticum spp.; Zea mays; Sorghum spp.</i>
CTC	DP	ACP	<i>Phaseolus vulgaris; Pisum sativum</i>
Biológicas			
Nematofauna do solo	DP	PERMANOVA; Correlação linear; ACP	<i>Glycine max</i>
Mineralização de COT	DP	Correlação linear; Regressão linear	<i>Zea mays</i>
Mineralização de NOS	DP	Correlação linear; Regressão linear	<i>Zea mays</i>
C-OXP	DP	Correlação linear; Regressão linear	<i>Zea mays</i>
MOS	DP	Regressão linear	<i>Eucalyptus spp.</i>
COS	DP	Regressão linear; Modelagem de produtividade	<i>Triticum spp.; Zea mays; Glycine max;</i> <i>Sorghum spp.; Oryza spp</i>
Outras			
IQS	DP	Regressão linear	<i>Zea mays; Solanum tuberosum;</i> <i>Beta vulgaris; Brassica oleracea</i>
Topografia	-	Correlação espacial	<i>Triticum spp.; Avena sativa;</i>

*CTC = Capacidade de troca de cátions; COT = Carbono Orgânico Total; NOS = Nitrogênio orgânico do solo; C-OXP = Carbono extraído por permanganato; MOS = Matéria orgânica do solo; IQS = Índice de qualidade do solo; IP = Inversamente proporcional; DP = Diretamente proporcional; ACP = Análise de componentes principais.

*As explicações para os efeitos do conteúdo de N, K e P foram obtidos de Taiz e Zeiger, (2006).

Tabela 1: Continuação.

Explicação	Referência
Condições melhores para o crescimento de raízes	Correa et al. (2009)
Condições melhores para o crescimento de raízes e retenção de água no solo	Victoria et al. (2012)
Maior disponibilidade de água e nutrientes para as plantas	Sá et al. (2009); Santi et al. (2012)
Aumento da CTC e da formação de agregados do solo	Sá et al. (2009); Gonçalves et al. (2012)
Componente de aminoácidos, proteínas, etc.	He et al. (2006); Guo et al. (2009); Jagadamma et al. (2008); Zhang et al. (2009); MacCarthy et al. (2009)
Cofator enzimático, requerido para a manutenção do turgor e da eletroneutralidade celular.	Santi et al. (2012)
Maior absorção de N pelas plantas	Culman et al. (2013)
Componente de fosfatos, ácidos nucleicos, etc. papel central nas reações que envolvem ATP	MacCarthy et al. (2009); Zhang et al. (2009)
Aumento da retenção e disponibilidade de nutrientes no solo	Mahanta et al. (2014)
Aumento da mineralização de NOS	Djigal et al. (2012)
Mineralização de nutrientes para as plantas	Culman et al. (2013)
Mineralização de N para as plantas	Culman et al. (2013)
Mineralização de nutrientes para as plantas	Culman et al. (2013)
Diversos, principalmente aumento da formação de agregados e da CTC do solo	Sá et al. (2009); Gonçalves et al. (2012)
Diversos, principalmente aumento da formação de agregados e da CTC do solo	Qiu et al. (2009); MacCarthy et al. (2009); Zhang et al. (2009); Sá et al. (2013); Sá et al. (2014)
Relação com várias variáveis que representam a fertilidade do solo	D'hose et al. (2014)
Acúmulo de argila ou de nutrientes em determinados locais	Kumhálová et al. (2011)

Tabela 2: Efeito do acúmulo de COT sobre variáveis que influenciam a produtividade de culturas.

Variáveis	Efeito no solo	Referência	Benefícios para a produtividade de culturas
Físicas	Aumento da agregação do solo	Tisdall e Oades, (1982) Pagliai et al. (2004) Tobiašová, (2011)	Diminuição da resistência à penetração do solo Aumento da capacidade de infiltração e retenção de água no solo Aumento da disponibilidade de O ₂ e outros gases
Químicas	Aumento da CTC do solo Diminuição do Ponto de carga zero do solo Redução do conteúdo de Al tóxico Descida de nutrientes para camadas mais profundas	Sparks, (2003) Sposito, (1984) Caires et al. (2008) Alleoni et al. (2010)	Aumento da retenção e disponibilização de nutrientes no solo
Biológicas	Aumento da população e diversidade microbiana Aumento do conteúdo de nutrientes associados à MOS	Sá et al. (2009) García-Orenes et al. (2013) Lienhard et al. (2012) Lienhard et al. (2013)	Aumento da mineralização de nutrientes

*CTC = Capacidade de troca catiônica; MOS = Matéria orgânica do solo.

4. Capítulo 1: Espacialização dos compartimentos de carbono orgânico do solo em escala da paisagem sob sistema plantio direto de longa duração

Resumo: Estudos sobre a variação espacial do conteúdo e estoque de C orgânico total (COT) se tornaram muito difundidos a partir da década dos 90. Eles podem servir de base para a elaboração de políticas públicas que visam o controle da erosão, do efeito estufa e o aumento da segurança alimentar. Os objetivos deste estudo foram mapear os compartimentos de COT em uma fazenda manejada há 30 anos no sistema plantio direto e verificar quais são as variáveis, dentre os atributos químicos, físicos, biológicos, topográficos e microclimáticos que interferem na variação espacial de COT. Foram coletadas amostras deformadas de todas as principais classes de solos da fazenda em todas as posições da paisagem. Foram analisados o COT, o C oxidado por permanganato (C-EXP) e o C extraído por água quente (C-EAQ). Foram gerados mapas com a variação espacial destas variáveis e os resultados foram analisados através de análise de componentes principais. O terço superior dos Latossolos e o terço inferior dos Cambissolos foram as áreas que apresentaram maiores conteúdos de COT. O maior conteúdo de argila e a maior adição de fitomassa nos Latossolos e a formação de um ambiente anaeróbico nos Cambissolos são os principais fatores que explicam as variações observadas no COT.

Palavras Chave: Variação espacial de carbono; carbono orgânico total; carbono oxidado por permanganato, carbono extraído por água quente.

Soil organic carbon spacialization in farm scale under long term no-till system

Abstract: Studies about the spatial variation of the total organic C (TOC) content and stocks in soils have become very popular since the 90s. It can serve as the base line for the development of public policies aimed at controlling the soil erosion, greenhouse effect, and increase food security. The aims of this study were to map the TOC pools on a farm whose no-till system is adopted since 30 years ago and see what are the variables including chemical, physical, biological, topographical and climatic that influence the spatial variation of TOC. Deformed samples were collected in all major soil types on the farm at all landscape positions. TOC, permanganate oxidized carbon (POX-C) and hot water extracted carbon (HWE-C) were analyzed. Maps showing the spatial variation of these variables were generated and the results were analyzed using a principal components analysis. The upper Oxisols and the lower Inceptisols showed higher TOC content. The higher clay content and the largest increment of biomass in Oxisols and the formation of an anaerobic condition in the Inceptisols are the main factors that explain the observed variations in TOC.

Key Words: Soil carbon spacialization; total organic carbon; permanganate oxidized carbon, hot-water extracted carbon.

5. Introdução

A espacialização do conteúdo e do estoque de C e N em escala da paisagem teve maior impulso na década dos 90 com a evolução de softwares referentes aos SIGs (POIER e RICHTER, 1992; DAVIDSON e LEFEBVRE, 1993; LEVINE et al., 1994). A utilização dos SIGs possibilitou avanço expressivo neste tipo de estudo (HARTEMINK, 2008; LILBURNE et al., 2012) porque permitiu o agrupamento de grande número de variáveis, a criação de diferentes cenários e uma visão panorâmica da paisagem.

Guo et al. (2006) em um trabalho aplicado em escala nacional nos Estados Unidos da América, discriminaram quais foram as variáveis que mais influenciaram o acúmulo de COT. Reportaram que o efeito da topografia e da temperatura média anual foram os componentes que mais explicaram a variação espacial de COT. Em outra situação, Schulp e Verburg (2009) nos Países Baixos, identificaram em escala mais reduzida que o uso e manejo do solo foram as variáveis que mais explicaram as variações no COT.

A linha de pesquisa dos inventários de COT em escala da paisagem considerando as diversas classes de solos proporcionou a elaboração de mapas com os estoques de C (BATJES, 1996; BERNOUX et al., 2002; TORNQUIST et al., 2009; SÁ et al., 2013a) e promoveu avanço expressivo no suporte para o entendimento da dinâmica do C.

Com o uso dos inventários de COT e os modelos matemáticos disponíveis tornou-se possível fazer previsões sobre o acúmulo de C em longo prazo (EASTER et al., 2007; TORNQUIST et al., 2009) Isto pode servir de base para a elaboração de políticas públicas que visam o controle do efeito estufa, o aumento da segurança alimentar e a diminuição de problemas críticos como a fome (CERRI et al., 2007; PAN et al., 2010). Assim, o mapeamento de COT em escala da fazenda é importante porque será uma ferramenta básica para a tomada de decisão de práticas agronômicas para desenvolver sistemas de produção mais sustentáveis.

O objetivo deste estudo concentrou-se nos seguintes pontos: a) realizar o inventário do conteúdo dos compartimentos de C até 1m de profundidade nas classes de solos existentes na fazenda Paiquerê; b) mapear os compartimentos de COT em escala de fazenda manejada há 30 anos no sistema plantio direto e c) verificar quais são as variáveis

- dentre estas atributos químicos, físicos, biológicos, topográficos e microclimáticos - que interferem na variação espacial de COT.

6. Material e métodos

6.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi realizado na Fazenda Paiquerê, propriedade do Sr. Lúcio Miranda, localizada no município de Piraí do Sul/Arapoti, cujas coordenadas geográficas são: latitude 24° S 20' 20" e longitude 50° O 07' 31" (Figura 4). A escolha do local de estudo foi devido à existência de uma base de dados detalhada sobre os componentes da produção e atributos do solo, aliada ao longo período (30 anos) em plantio direto contínuo.

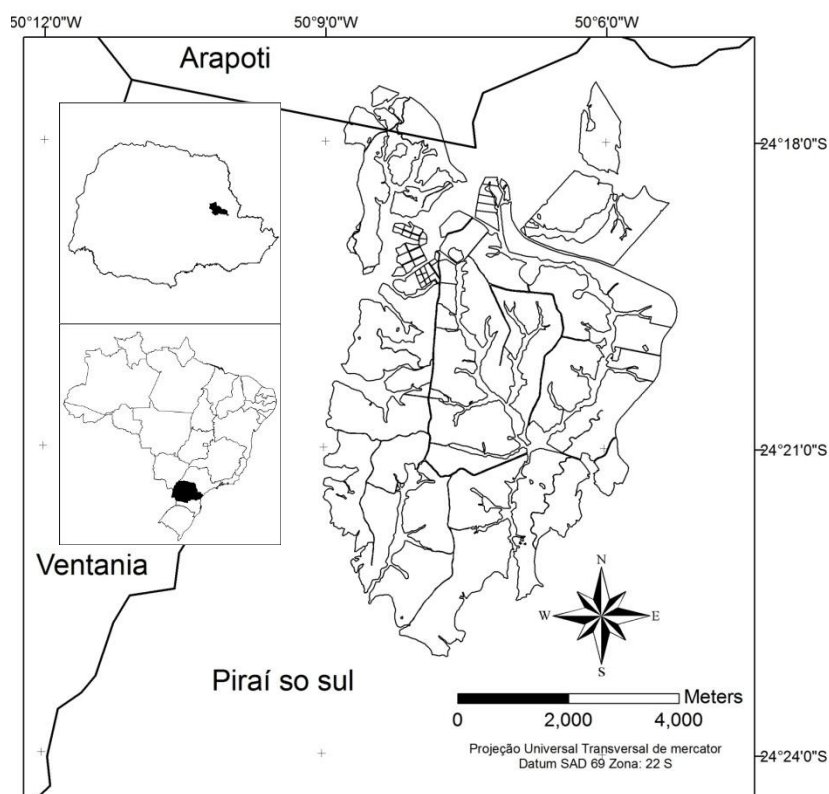


Figura 4: Localização da área de estudo - Fazenda Paiquerê em Pirai do Sul, PR.

*O município de Pirai do Sul está destacado no mapa do Paraná porque a maior parte da fazenda está localizada nele.

A altitude média da fazenda é de 970 m, o clima da região é classificado como cfb (classificação de Köppen) e corresponde ao clima subtropical húmido, com estações bem definidas, com a temperatura média máxima de 25,9 °C e a média mínima de 13,5 °C (IAPAR, 2013). A precipitação pluvial anual média da região situa-se entre 1524 e 1860 mm e a precipitação média mensal na Fazenda Paiquerê (Figura 5) situa-se entre o mesmo intervalo.

O material de origem do solo na região é composto basicamente por sedimentos clásticos do período Devoniano, arenitos da formação Furnas e folhelhos da formação Ponta Grossa (MINEROPAR, 2013). A vegetação típica da região era originalmente composta por campos dominado por espécies C4 como *Andropogon sp.*, *Aristida sp.*, *Paspalum sp.*, e *Panicum sp.* (BEHLING, 1997).

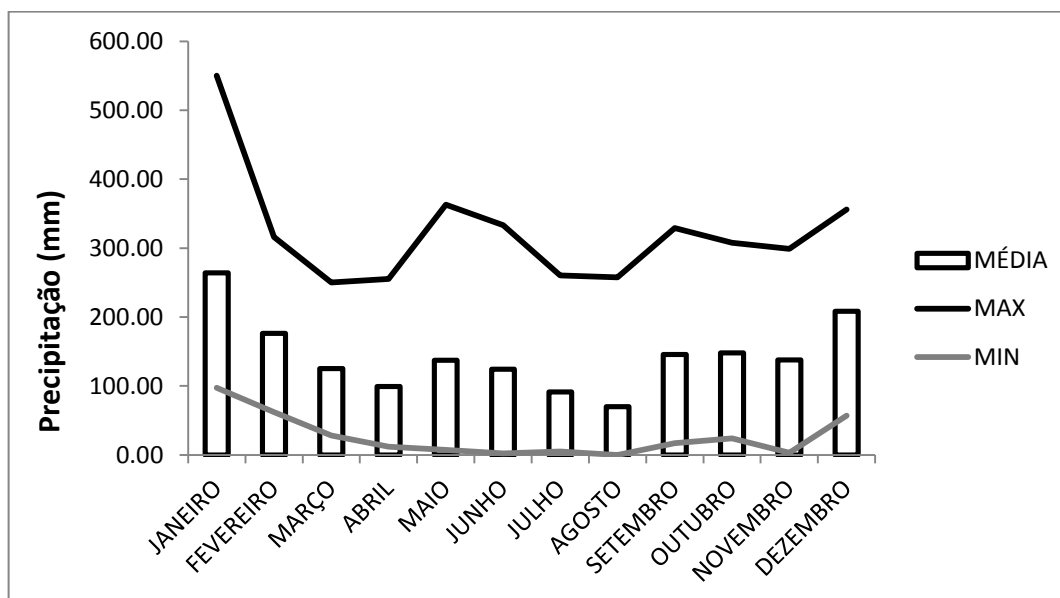


Figura 5: Precipitação pluviométrica mensal na Fazenda Paiquerê entre os anos 1986 e 2013.

O relevo da fazenda é predominantemente suave ondulado a ondulado, cuja declividade nos talhões varia entre 3 e 10%. As principais classes de solo encontradas na fazenda são: Latossolos Vermelhos; Latossolos Vermelho-Amarelos; Cambissolos Húmicos; Cambissolos Háplicos; Neossolos Litólicos e Gleissolos Melânicos.

O plano de uso do solo da fazenda é fundamentado no levantamento de solos detalhado realizado em escala 1:10.000. A fazenda foi dividida em 24 talhões que foram agrupados em 3 grupos. Cada grupo representa 1/3 da superfície da fazenda e recebe um sistema de sucessão durante o ano agrícola. No inverno, 2/3 da área é cultivada com trigo (*Triticum aestivum* L.) e 1/3 com aveia preta (*Avena sativa* L.). No verão, é cultivada a soja (*Glycine max* L.) após a colheita do trigo e o milho (*Zea mays* L.) após a colheita da aveia preta. A distribuição de cada sucessão é descrita da seguinte forma: 1/3 da área da fazenda é ocupada com a sucessão Trigo /Soja, doravante designada de S1; 1/3 com a sucessão Trigo /Soja, doravante designada de S2 e 1/3 com a sucessão Aveia /Milho, doravante designada de S3 (Figura 6). No ano seguinte, o grupo de talhões com a S1 dá lugar à S2 e assim sucessivamente. A cada dois anos é realizada uma amostragem de solos direcionada por áreas de manejo dentro de cada talhão para analisar os componentes da fertilidade do solo e dar suporte às estratégias de adubação das culturas. Durante o

desenvolvimento das culturas, é realizado o manejo fitossanitário e, quando necessário, a complementação da nutrição das plantas.

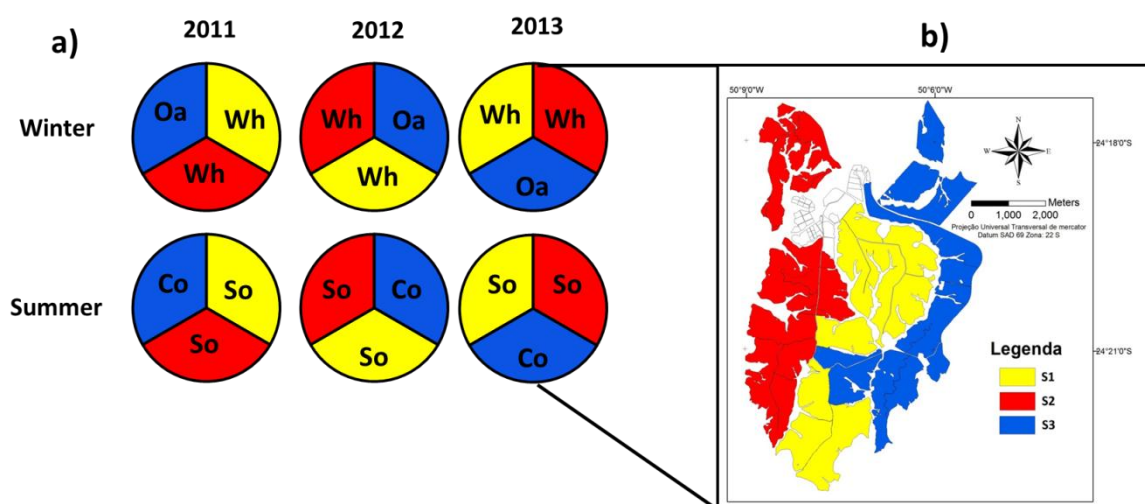


Figura 6: a) Descrição do processo sucessão de culturas utilizado na fazenda. b) Estágio de sucessão de culturas na área de estudo em 2013 durante a amostragem;
*S1 = Trigo/Soja; S2 = Trigo/Soja; S3 = Aveia/Milho.

Como a estratégia adotada na fazenda preconiza construção da fertilidade do solo, ao longo dos últimos 17 anos houve um incremento na produtividade média das culturas (Tabela 3).

Tabela 3: Médias históricas de produtividade de grãos e aporte de C proveniente das raízes, da parte aérea e total das culturas.

Safr	Cultura	Médias			
		Produtividade de grãos	Aporte de C parte aérea [£]	Aporte de C raízes [£]	Aporte total de C [£]
97/98	Soja	3.2	1.42	0.28	1.38
	Trigo	3.7	1.73	0.26	1.81
	Milho	7.2	3.00	0.75	4.45
98/99	Soja	3.3	1.44	0.29	1.40
	Trigo	3.2	1.50	0.23	1.57
	Milho	6.4	2.64	0.66	3.92
99/2000	Soja	3.1	1.38	0.28	1.34
	Trigo	2.8	1.35	0.20	1.41
	Milho	6.9	2.87	0.72	4.26
2000/2001	Soja	3.2	1.40	0.28	1.36
	Trigo	2.2	1.04	0.16	1.09
	Milho	8.3	3.44	0.86	5.11

2001/2002	Soja	3.4	1.49	0.30	1.44
	Trigo	4.3	2.04	0.31	2.13
	Milho	9.5	3.95	0.99	5.86
2002/2003	Soja	3.6	1.58	0.32	1.54
	Trigo	1.3	0.61	0.09	0.64
	Milho	8.9	3.66	0.92	5.44
2003/2004	Soja	3.4	1.51	0.30	1.47
	Trigo	4.7	2.21	0.33	2.31
	Milho	9.5	3.93	0.98	5.83
2004/2005	Soja	3.0	1.35	0.27	1.31
	Trigo	3.1	1.49	0.22	1.55
	Milho	8.6	3.55	0.89	5.27
2005/2006	Soja	3.4	1.49	0.30	1.44
	Trigo	3.4	1.63	0.24	1.70
	Milho	9.6	3.98	1.00	5.91
2006/2007	Soja	3.7	1.62	0.32	1.57
	Trigo	3.0	1.41	0.21	1.47
	Milho	8.6	3.55	0.89	5.27
2007/2008	Soja	3.0	1.33	0.27	1.29
	Trigo	2.6	1.21	0.18	1.27
	Milho	8.0	3.30	0.83	4.90
2008/2009	Soja	3.1	1.40	0.28	1.35
	Trigo	3.5	1.68	0.25	1.76
	Milho	8.8	3.63	0.91	5.39
2009/2010	Soja	3.3	1.46	0.29	1.41
	Trigo	2.1	0.97	0.15	1.02
	Milho	10.3	4.25	1.06	6.31
2010/2011	Soja	4.0	1.79	0.36	1.74
	Trigo	4.4	2.08	0.31	2.18
	Milho	10.3	4.26	1.07	6.33
2011/2012	Soja	3.5	1.55	0.31	1.51
	Trigo	3.1	1.47	0.22	1.54
	Milho	10.4	4.30	1.08	6.39
2012/2013	Soja	4.0	1.78	0.36	1.72
	Trigo	3.6	1.73	0.26	1.80
	Milho	10.5	4.33	1.08	6.44
Total		246.9	106.8	23.1	135.6

£ Os valores de aporte de C pelas raízes, parte aérea e total das culturas foram estimados com base na metodologia descrita em Sá et al. (2014).

6.2 PROCEDIMENTO DE AMOSTRAGEM DO SOLO

As amostras de solo foram coletadas em áreas pré-definidas em cada classe de solo denominadas de “benchmarks” (Figura 7), que representam a área de referência. As dimensões da área de referência eram de 30x30 m e as amostras foram coletadas nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-40, 40-70 e 70-100 cm. Em cada profundidade de

amostragem foram coletadas cinco sub-amostras (figura 7) para constituir uma amostra composta.

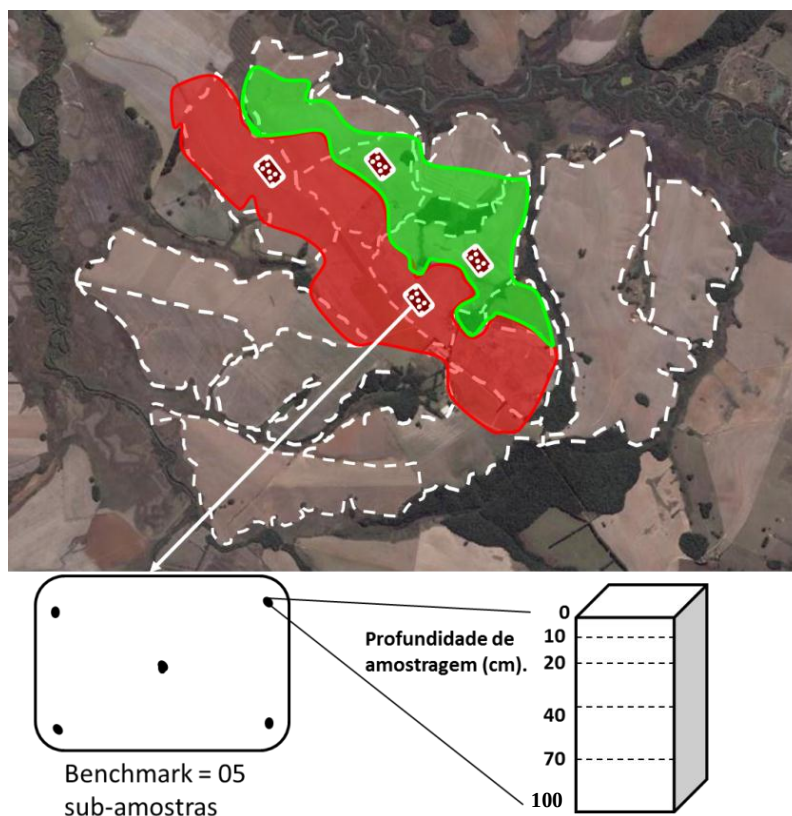


Figura 7: Esquema de um “Benchmark”, uma unidade de amostragem, adaptado de Sá et al. (2013)a.

O critério para definir os locais de amostragem (Figura 8) foi em função do talhão operacional da fazenda e da classe de solo. A coleta em cada classe de solo foi dividida em três partes – terço superior, terço médio e terço inferior – a fim de acessar o gradiente textural representado pelas posições na paisagem. A posição dos “benchmarks” em cada classe de solo e em cada terço da vertente foi definida através de um mapa hipsométrico gerado a partir de curvas de nível da base de dados da Fazenda Paiquerê.

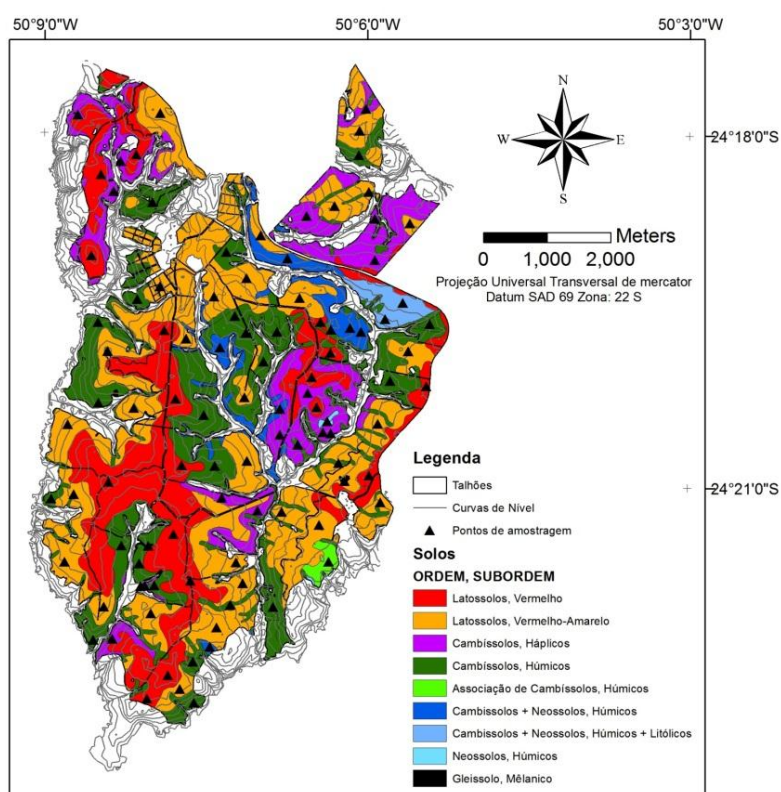


Figura 8: Representação dos locais de amostragem com as cotas de altitude e as principais classes de solo existentes na fazenda.

6.3 PREPARO DAS AMOSTRAS

As amostras foram transportadas até o laboratório de matéria orgânica do solo (LABMOS) e foram secas em estufa a 40 °C até atingirem peso constante. Posteriormente, com o auxílio de um rolo de madeira, as amostras foram destorroadas e passadas em uma peneira de 2 mm. Neste estágio de preparo, encontravam-se prontas para a realização de análises do compartimento lábil do C (extração com água quente e oxidação com permanganato). Uma porção correspondente a 1 cm³ de solo foi finamente moída com o auxílio de um graal e um pistilo para a determinação do C e N total.

6.4 ANÁLISES REALIZADAS

6.5 Carbono lábil extraído por água quente (C-EAQ)

A extração do C com a água quente foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Ghani et al. (2003) e a determinação do C foi obtida com a oxidação em meio ácido e a titulação com o sulfato ferroso conforme Walckley e Black (1934). Resumidamente pesou-se 3 g de solo em um erlenmeyer e adicionou-se 9 ml de água. Posteriormente, encubou-se em uma estufa a 80 °C por 16 horas. Em seguida, pipetou-se 6 ml do sobrenadante para fazer a leitura do C via úmida. Esta consistiu em adicionar 10 ml de dicromato de potássio, 10 ml de ácido sulfúrico e 3 ml de ácido fosfórico, proceder descanso por uma hora e realizar a titulação do excesso de dicromato com uma solução de sulfato ferroso.

6.5.2 Carbono Oxidado por Permanganato (C-OMP)

A determinação do C-OMP foi realizada de acordo com a metodologia descrita em Weil, et al. (2003), a saber: pesou-se 3 g de solo em um tubete, adicionou-se 6 ml de 0.2 M KMnO_4 , agitou-se por 15 min a 200 oscilações por minuto e centrifugou-se por 15 min a 4000 RPM. Esperou-se 10 min para que ocorra a oxidação do C, pipetou-se uma alíquota de 2,0 ml da solução em um erlenmeyer e completou-se com 50 ml de água deionizada. A quantificação do C-OMP foi, então, feita via espectrofotômetro em absorbância ajustada para 565 nm.

6.5.3 Carbono Orgânico Total (COT) e Nitrogênio total (NT)

A determinação do COT e do NT foi realizada pelo método de combustão seca à uma temperatura de 950° C, utilizando-se um determinador elementar de C e N (Truspec

CN LECO® 2006, St.Joseph, EUA). O COT foi considerado como o total de C existente no solo, porque o C inorgânico presente nos solos desta região é menor que 0,1% para Latossolos e que 0,25% para Cambissolos, na região os solos não são derivadas de minerais carbonáceos (SÁ et al., 2013a).

6.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As diferenças entre as fontes de variação (classes de solo e posições na paisagem) foram acessadas em função das médias e os desvios padrão de COT, NT, C-OXP, C-EAQ e da relação C/N do solo por: (i) classe de solo; (ii) posição na paisagem dentro de cada classe de solo; (iii) estágio de sucessão de culturas (em que o local amostrado se encontrava no momento da amostragem), para todas as profundidades. Também foram calculadas as relações de estratificação entre as camadas 0-10 e 20-40 cm para todas as variáveis mencionadas. As médias calculadas para os estágios de sucessão de culturas foram utilizadas porque os compartimentos mais lábeis do COT podem ser afetados pelo manejo do solo em curto prazo (CULMAN et al. 2012). A interpretação das informações foi baseada na análise de componentes principais (ACP), considerando as médias das variáveis analisadas calculadas por classe de solo.

Foram obtidos da base de dados da Fazenda Paiquerê os conteúdos de argila, silte e areia do solo para os locais de amostragem. O efeito da textura no acúmulo de COT foi analisado pela regressão linear simples entre o conteúdo de argila e a concentração de COT. Também foram calculados os desvios padrão dos conteúdos de argila, silte e areia por: (i) classe de solo; (ii) posição na paisagem e (iii) estágio de sucessão de culturas.

As visualizações da variação espacial do COT, C-OXP e C-EAQ foram obtidas com base em mapas gerados utilizando modelos “spline” utilizando-se os polígonos dos talhões como “barreiras”. Os modelos “spline” foram escolhidos pela menor exigência quanto à homogeneidade de espaçamento entre os “benchmarks” amostrados.

Foi utilizado o software ArcGIS v. 10.2.1 para o ajuste e a análise dos modelos de elevação digital, a organização dos mapas, as informações georreferenciadas, o ajuste dos modelos “spline” e a geração dos mapas de variação espacial das variáveis analisadas. Para

o cálculo das médias e o ajuste de regressão linear simples foi utilizado o software Excel 2010 e para a realização da ACP foi utilizado o software R v. 2.15.2.

7. Resultados e Discussão

7.1 COMPARTIMENTOS DE CARBONO ORGÂNICO TOTAL POR CLASSE DE SOLO E POSIÇÃO NA PAISAGEM

Os compartimentos de C variaram conforme as classes de solo. No terço superior dos Latossolos constatou-se maior conteúdo de COT, enquanto nos Cambissolos os maiores conteúdos foram identificados no terço inferior (Tabela 4). Do mesmo modo como não foram observadas diferenças expressivas entre o conteúdo de argila dos terços superior e inferior em cada classe de solo (Tabela 5), também não se verificaram variações expressivas no conteúdo de C. Isto indica que as diferenças observadas nos conteúdos de COT entre as classes de solo e posições na paisagem são devidas a outras variáveis associadas ao plantio direto de longa duração.

Tabela 4: Média do conteúdo de C orgânico total (COT), C nos compartimentos lábeis, N total (NT) e a relação C/N por classe de solo e posição na paisagem.

Classe de Solo	Prof. de coleta cm	Local de coleta das amostras em cada classe de solo														
		Terço superior					Terço médio					Terço inferior				
		COT	NT	C-OXP	C-EAQ	C/N	COT	NT	C-OXP	C-EAQ	C/N	COT	NT	C-OXP	C-EAQ	C/N
		g kg ⁻¹					g kg ⁻¹					g kg ⁻¹				
LV	0-10	40,8 ^{±6,1}	2,6 ^{±0,7}	4,51 ^{±1}	0,78 ^{±0,6}	16,8 ^{±5,4}	34,8 ^{±9,5}	2,4 ^{±0,7}	4,29 ^{±0,9}	0,63 ^{±0,5}	14,6 ^{±2,1}	36,1 ^{±5,3}	2,0 ^{±0,2}	3,16 ^{±1}	0,55 ^{±0,5}	18,7 ^{±4,6}
	10-20	35,7 ^{±7,4}	2,1 ^{±0,7}	3,95 ^{±1}	0,59 ^{±0,6}	19,3 ^{±7,5}	30,8 ^{±8,6}	2,0 ^{±0,6}	3,95 ^{±0,8}	0,61 ^{±0,6}	15,3 ^{±1,6}	32,4 ^{±4,6}	1,5 ^{±0,3}	3,07 ^{±1,2}	0,72 ^{±0,8}	22,8 ^{±8,3}
	20-40	26,8 ^{±5,9}	1,4 ^{±0,4}	3,21 ^{±0,8}	0,46 ^{±0,6}	20,7 ^{±6,2}	23,8 ^{±7,5}	1,3 ^{±0,4}	3,19 ^{±0,5}	0,55 ^{±0,5}	18,0 ^{±5,1}	27,6 ^{±2,4}	1,3 ^{±0,4}	2,73 ^{±0,7}	0,48 ^{±0,5}	21,6 ^{±8,3}
	40-70	18,3 ^{±6,0}	1,0 ^{±0,3}	2,58 ^{±0,5}	0,44 ^{±0,6}	19,5 ^{±3,6}	15,6 ^{±6,0}	0,9 ^{±0,4}	2,70 ^{±0,4}	0,33 ^{±0,3}	19,7 ^{±9,9}	18,8 ^{±0,2}	0,8 ^{±0,5}	1,94 ^{±1,0}	0,46 ^{±0,5}	30,1 ^{±18,9}
	70-100	14,4 ^{±6,2}	0,7 ^{±0,3}	2,74 ^{±0,8}	0,37 ^{±0,5}	20,8 ^{±9,0}	14,1 ^{±4,7}	0,6 ^{±0,2}	2,45 ^{±0,4}	0,23 ^{±0,3}	22,8 ^{±7,0}	14,7 ^{±2,0}	0,6 ^{±0,4}	2,19 ^{±0,8}	0,52 ^{±0,2}	29,4 ^{±22,0}
LVA	0-10	36,7 ^{±7,6}	2,4 ^{±0,4}	4,59 ^{±0,5}	0,70 ^{±0,6}	15,4 ^{±3,7}	36,4 ^{±8,4}	2,4 ^{±0,8}	4,56 ^{±0,6}	0,59 ^{±0,5}	15,8 ^{±3,2}	39,7 ^{±5,3}	2,7 ^{±0,5}	3,73 ^{±1,2}	0,59 ^{±0,3}	15,0 ^{±1,6}
	10-20	31,9 ^{±9,0}	1,7 ^{±0,6}	3,89 ^{±0,5}	0,63 ^{±0,2}	20,7 ^{±3,6}	31,7 ^{±9,0}	1,9 ^{±0,6}	4,01 ^{±0,5}	0,38 ^{±0,2}	17,2 ^{±3,6}	36,0 ^{±5,1}	2,3 ^{±0,4}	3,34 ^{±1,4}	0,47 ^{±0,3}	15,6 ^{±1,2}
	20-40	26,7 ^{±7,0}	1,6 ^{±0,6}	3,15 ^{±0,6}	0,57 ^{±0,6}	18,4 ^{±7,4}	25,4 ^{±7,5}	1,4 ^{±0,5}	3,30 ^{±0,6}	0,27 ^{±0,2}	20,7 ^{±9,0}	28,8 ^{±3,3}	1,7 ^{±0,3}	3,09 ^{±1,1}	0,39 ^{±0,3}	16,8 ^{±1,8}
	40-70	17,6 ^{±5,3}	0,9 ^{±0,5}	2,63 ^{±0,5}	0,49 ^{±0,5}	24,4 ^{±9,6}	16,8 ^{±5,5}	0,8 ^{±0,4}	2,65 ^{±0,5}	0,18 ^{±0,1}	23,0 ^{±9,8}	19,9 ^{±1,8}	1,1 ^{±0,3}	2,34 ^{±0,8}	0,35 ^{±0,4}	19,8 ^{±6,2}
	70-100	13,2 ^{±3,0}	0,6 ^{±0,2}	2,33 ^{±0,4}	0,46 ^{±0,5}	23,5 ^{±5,2}	12,7 ^{±5,7}	0,6 ^{±0,3}	2,51 ^{±0,4}	0,18 ^{±0,3}	25,4 ^{±12,1}	20,8 ^{±9,7}	1,2 ^{±0,7}	2,34 ^{±0,9}	0,28 ^{±0,3}	17,8 ^{±5,0}
CH	0-10	37,2 ^{±8,7}	2,5 ^{±0,1}	4,35 ^{±0,8}	0,75 ^{±0,2}	16,1 ^{±4,4}	37,5 ^{±10,8}	2,5 ^{±1}	4,66 ^{±0,8}	0,62 ^{±0,2}	16,0 ^{±2,4}	35,0 ^{±10,3}	2,4 ^{±0,9}	4,36 ^{±0,9}	0,67 ^{±0,4}	15,7 ^{±4,5}
	10-20	32,6 ^{±6,8}	2,0 ^{±0,7}	3,83 ^{±0,5}	0,64 ^{±0,2}	16,8 ^{±3,6}	33,7 ^{±8,6}	1,9 ^{±0,6}	4,05 ^{±0,7}	0,47 ^{±0,2}	18,1 ^{±2,5}	26,4 ^{±10,6}	1,6 ^{±0,9}	3,62 ^{±0,8}	0,34 ^{±0,3}	17,5 ^{±12,8}
	20-40	25,9 ^{±3,7}	1,3 ^{±0,3}	3,24 ^{±0,4}	0,35 ^{±0,1}	20,8 ^{±4,0}	24,6 ^{±5,9}	1,3 ^{±0,5}	3,63 ^{±0,6}	0,40 ^{±0,1}	20,1 ^{±6,0}	21,6 ^{±8,0}	1,2 ^{±0,5}	3,19 ^{±0,7}	0,40 ^{±0,3}	19,7 ^{±6,3}
	40-70	19,4 ^{±4,9}	0,9 ^{±0,5}	2,94 ^{±0,5}	0,23 ^{±0,1}	30,1 ^{±22,5}	18,3 ^{±9,7}	1,1 ^{±0,5}	2,85 ^{±0,6}	0,26 ^{±0,1}	16,6 ^{±0,8}	17,7 ^{±8,3}	0,8 ^{±0,5}	2,85 ^{±0,7}	0,36 ^{±0,3}	26,3 ^{±11,9}
	70-100	12,0 ^{±4,7}	0,6 ^{±0,2}	2,48 ^{±0,9}	0,18 ^{±0,1}	25,8 ^{±17,6}	11,8 ^{±4,6}	0,8 ^{±0,1}	2,74 ^{±0,3}	0,25 ^{±0,2}	14,4 ^{±6,3}	14,8 ^{±6,7}	0,7 ^{±0,4}	2,68 ^{±0,6}	0,29 ^{±0,3}	23,2 ^{±13,5}
CH+RL	0-10	29,2 ^{±0}	2,3 ^{±0}	3,52 ^{±0}	0,70 ^{±0}	12,8 ^{±0}	38,9 ^{±2,7}	2,4 ^{±0,1}	4,03 ^{±0,8}	0,52 ^{±0,3}	18,4 ^{±7,2}	30,0 ^{±9,3}	2,0 ^{±0,5}	3,88 ^{±0,2}	0,43 ^{±0,2}	15,7 ^{±4,3}
	10-20	28,9 ^{±0}	2,8 ^{±0}	3,33 ^{±0}	0,50 ^{±0}	10,2 ^{±0}	37,4 ^{±3,0}	1,9 ^{±0,8}	3,65 ^{±0,6}	0,41 ^{±0,3}	21,4 ^{±7,6}	26,4 ^{±9,0}	1,6 ^{±0,6}	3,62 ^{±0,3}	0,34 ^{±0,1}	17,5 ^{±5,4}
	20-40	26,5 ^{±0}	1,9 ^{±0}	3,25 ^{±0}	0,50 ^{±0}	13,8 ^{±0}	27,0 ^{±2,7}	1,6 ^{±0,5}	2,95 ^{±0,4}	0,33 ^{±0,2}	18,4 ^{±5,4}	21,8 ^{±9,5}	1,2 ^{±0,3}	3,05 ^{±0,3}	0,23 ^{±0,1}	18,4 ^{±5,5}
	40-70	12,1 ^{±0}	1,4 ^{±0}	2,72 ^{±0}	0,39 ^{±0}	8,2 ^{±0}	17,3 ^{±1,7}	0,8 ^{±0,1}	2,35 ^{±0,3}	0,17 ^{±0,1}	21,1 ^{±2,4}	15,2 ^{±5,0}	0,7 ^{±0,2}	2,76 ^{±0,1}	0,20 ^{±0,1}	21,5 ^{±9,0}
	70-100	5,3 ^{±0}	2,0 ^{±0}	2,5 ^{±0}	0,5 ^{±0}	22,3 ^{±0}	13,6 ^{±3,0}	0,5 ^{±0,1}	2,27 ^{±0,3}	0,11 ^{±0,8}	25,6 ^{±6,7}	12,2 ^{±4,3}	0,5 ^{±0,2}	2,55 ^{±0,3}	0,14 ^{±0,1}	31,7 ^{±14,2}
CX	0-10	37,7 ^{±1,5}	2,8 ^{±0,1}	4,86 ^{±1,2}	0,60 ^{±0,2}	14,6 ^{±4,3}	40,3 ^{±18,7}	2,9 ^{±0,2}	5,76 ^{±0,2}	0,45 ^{±0,2}	16,0 ^{±4,6}	44,9 ^{±15,8}	3,0 ^{±0,1}	4,73 ^{±1}	0,62 ^{±0,1}	15,0 ^{±1,1}
	10-20	32,8 ^{±12,3}	2,0 ^{±1,3}	3,53 ^{±0,1}	0,45 ^{±0,1}	20,8 ^{±11,3}	33,7 ^{±1,4}	2,2 ^{±1,8}	4,76 ^{±0,1}	0,32 ^{±0,2}	19,1 ^{±6,6}	41,1 ^{±20,8}	2,6 ^{±1,4}	3,97 ^{±0,4}	0,57 ^{±0,1}	15,8 ^{±1,7}
	20-40	29,2 ^{±9,8}	1,7 ^{±0,7}	3,76 ^{±0,8}	0,52 ^{±0,2}	17,7 ^{±2,7}	24,3 ^{±6,4}	1,3 ^{±0,7}	3,79 ^{±0,8}	0,31 ^{±0,1}	19,8 ^{±5,6}	32,7 ^{±1,6}	1,9 ^{±1,2}	3,68 ^{±0,6}	0,36 ^{±0,2}	18,5 ^{±6,1}
	40-70	20,1 ^{±6,1}	1,2 ^{±0,7}	2,87 ^{±0,8}	0,33 ^{±0,6}	20,1 ^{±7,3}	16,4 ^{±4,5}	1,0 ^{±0,3}	3,48 ^{±0,7}	0,19 ^{±0,2}	17,9 ^{±5,0}	26,5 ^{±18,1}	1,3 ^{±0,1}	2,86 ^{±0,3}	0,11 ^{±0,1}	20,8 ^{±1,5}
	70-100	11,8 ^{±3,4}	0,5 ^{±0,2}	2,39 ^{±1,0}	0,21 ^{±0,1}	27,2 ^{±8,1}	8,6 ^{±0,3}	0,6 ^{±0,1}	2,87 ^{±0,6}	0,10 ^{±0,8}	14,3 ^{±2,0}	16,3 ^{±7,0}	0,7 ^{±0,3}	2,78 ^{±0,2}	0,23 ^{±0,3}	23,4 ^{±7,5}

⁸ Refere-se ao desvio padrão em relação a média; COT = Carbono Orgânico Total; NT = Nitrogênio total; C-PERM = Carbono extraído por permanganato; C-EAQ = Carbono extraído por água quente; C/N = Relação C/N; LV = Latossolo Vermelho; LVA = Latossolo Vermelho Amarelo; CH = Cambissolo Húmico; CH+RL = Cambissolo Húmico + Neossolo Litólico; CX = Cambissolo Háplico.

Tabela 5: Médias do conteúdo de argila, silte e areia na profundidade de 0-20 cm, calculadas por classe de solo e posição na paisagem.

Solo	Argila	Silte	Areia
LV	646,0 ^{±16,1}	111,3 ^{±6,6}	242,7 ^{±15,4}
LVA	604,4 ^{±16,1}	127,2 ^{±6,9}	268,3 ^{±17,9}
CH	517,4 ^{±15,1}	190,0 ^{±9,4}	292,6 ^{±16,6}
CH+RL	485,6 ^{±14,7}	192,2 ^{±9,2}	322,2 ^{±17,7}
CX	526,7 ^{±16,5}	143,3 ^{±10,1}	330,0 ^{±22,6}
Posição na Paisagem			
Terço superior	576,7 ^{±13,9}	312,7 ^{±7,0}	264,0 ^{±12,8}
Terço médio	581,1 ^{±15,6}	295,2 ^{±7,3}	285,9 ^{±17,0}
Terço inferior	545,6 ^{±18,1}	266,3 ^{±10,4}	279,3 ^{±18,8}

*LV = Latossolo Vermelho; LVA = Latossolo Vermelho Amarelo; CH = Cambissolo Húmico; CH+RL = Cambissolo Húmico + Neossolo Litólico; CX = Cambissolo Háplico.

O elevado conteúdo de COT tanto no LV como no LVA pode ser explicado das seguintes formas:

i) O maior conteúdo de argila nessas classes comparadas às demais (Tabela 5). Tem sido bem reportado na literatura o efeito da argila no acúmulo de C. Recentemente, Sá et al. (2013a) reportaram que a relação entre o conteúdo de argila e o acúmulo de C para Latossolos na camada de 0-20 cm e 20-70 cm foi expressiva, cujo coeficiente angular foi de 0,047 e 0,026 g C kg⁻¹ de argila, respectivamente. Para os Cambissolos foi semelhante e apontou 0,049 e 0,030 g C kg⁻¹ de argila para a camada de 0-20 e 20-70 cm, respectivamente. Wang et al. (2012) relatou que o coeficiente de correlação entre o conteúdo de argila do solo e o COT foi de 0,40 ($P < 0,001$), semelhante ao obtido este trabalho que foi de 0,35 ($P < 0,001$);

ii) O maior aporte de matéria orgânica, causado pelo maior rendimento de culturas (Tabela 3 e Figura 9). Vários autores relatam que o rendimento de grãos e produção de fitomassa são altamente correlacionados (GERALDO et al., 2000; ARAUJO e TEIXEIRA, 2012), o que indica que em áreas onde a produção de grãos foi maior, o aporte de fitomassa seca via resíduos culturais também o foi. Como o LV e o LVA apresentaram os maiores rendimentos de grãos (Figura 8 e Figura 9) podem também ter recebido maior retorno de fitomassa do que as outras classes de solo.

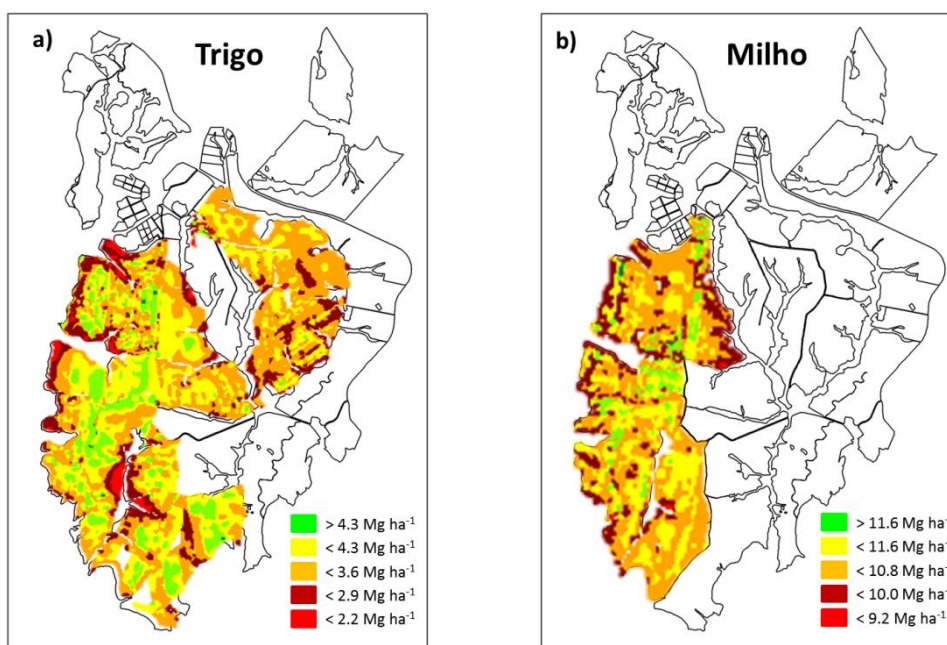


Figura 9: Mapas de colheita das culturas de trigo (2012) e milho (2011/2012).

*A produtividade máxima na fazenda para trigo (2012) foi de 4.355 kg ha^{-1} e a mínima foi 1.939 kg ha^{-1} . A produtividade máxima na fazenda para milho (2011/2012) foi de $11.610 \text{ kg ha}^{-1}$ e a mínima foi 9167 kg ha^{-1} .

As classes de solo CH e CH+RL apresentaram menores conteúdos de COT, o que pode ser devido ao menor aporte de fitomassa aos Cambissolos comparados com o LV e o LVA (Figura 8 e Figura 9). O CH+RL e o CH geralmente apresentam menor profundidade efetiva do que os demais (EMBRAPA, 2005) o que pode ter contribuído para as produtividades mais baixas das culturas, associado ainda ao menor conteúdo de argila nestas classes de solo (Tabela 5).

A variação espacial do NT acompanhou o COT (Tabela 4). Esta alta relação entre as duas variáveis é bem conhecida, pois a maior parte do N se encontra na forma orgânica e associado à MOS (RASMUNSEN et al., 1998; POIRIER et al., 2009). Gil et al. (2008) relataram a correlação de 0.89 ($P < 0,05$) entre o conteúdo de MO e de NT no solo.

A variação espacial de C-EXP acompanhou o COT (Tabela 4). A principal razão apontada para os maiores conteúdos de C-Lábil observados em CX foi: a anaerobiose dificultando a oxidação de C. Dessa forma, pode-se afirmar que as condições locais foram favoráveis para o acúmulo de C-Lábil.

A variação na espacialização do C-EAQ não teve a mesma tendência do COT como as demais variáveis (Tabela 4). A ocorrência de um ambiente anaeróbico mesmo em curto período de tempo contribuiu para a redução do C-EAQ já que o CX e CH+RL apresentaram os menores conteúdos. Por outro lado, a variação espacial do C-EAQ foi maior do que a do C-OXP, a sensibilidade deste compartimento ao manejo do solo é maior, assim o estágio de sucessão de culturas exerce influência maior sobre o conteúdo de C-EAQ.

Estudando a variação espacial do COT, Wang et al. (2012) descreveram que a altitude, a declividade, o conteúdo de argila e a umidade do solo explicaram 70,3% da variação espacial de COT e 67,1% da de NT. Meersmans et al. (2008) consideraram a drenagem e a textura em uma regressão múltipla para acessar os estoques de COT na região de Flanders na Bélgica. Guo et al. (2006) consideraram a topografia o principal fator que determinou o acúmulo de COT e Muller e Pierce (2003) relataram um acúmulo de COT em regiões mais baixas da paisagem em trabalhos realizado nos EUA.

As variáveis medidas na camada de 10-20 seguiram o mesmo comportamento observado na camada de 0-10 cm (Tabela 4). Na camada de 20-40 cm, a variação espacial das variáveis acompanhou as camadas de 0-10 e 10-20 cm (Tabela 4). Em contraste, o conteúdo de C-EAQ apresentou valores elevados no LV, o que pode ser o resultado da exudação radicular, estimulando comunidades microbianas diferentes na região do solo próximo às raízes das plantas (JONES et al., 2004). Nas camadas de 40-70 e 70-100 cm os conteúdos de C-EAQ podem ser devidos à contribuição das raízes (SÁ et al., 2013; SÁ et al., 2014).

Os conteúdos de COT observados nas camadas mais profundas, $14.4^{\pm 6.2}$ e $13.2^{\pm 3}$ para LV e LVA respectivamente podem ser explicados pela descida do C no perfil do solo que ocorre em sistema plantio direto. Alguns autores descreveram como ocorre esse processo (RUMPEL et al. 2009; CHABBI et al. 2009), as principais razões relatadas estão associadas à descida de ácidos orgânicos solúveis por caminhos preferenciais como os poros formados por raízes. Assim, como vai ocorrendo a saturação do C nas camadas superficiais os novos compostos descem através do perfil do solo. A contribuição da decomposição do sistema radicular das culturas é também elevada.

7.2 COMPARTIMENTOS DE C E N NAS CLASSES DE SOLO

A análise dos componentes principais demonstrou que o CP1 resumiu 79% da variância total e o CP2 resumiu 19%, totalizando 98% da variância total do conjunto de dados explicados pelos dois primeiros componentes (Figura 10). As variáveis COT, C-OXP e NT apresentaram correlação linear positiva, a relação C/N do solo apresentou correlação linear negativa com as outras três (COT, C-OXP e NT) e C-EAQ apresentou correlação linear nula com as mesmas. A correlação linear nula entre o C-EAQ e as demais variáveis analisadas pode ser devida ao fato de que fenômenos biológicos como o crescimento da biomassa microbiana geralmente são ajustados matematicamente por modelos não lineares, desta forma, esta variável não apresentaria correlação linear com as demais, e a sua relação com as outras variáveis não seria captada corretamente pela ACP (Figura 10).

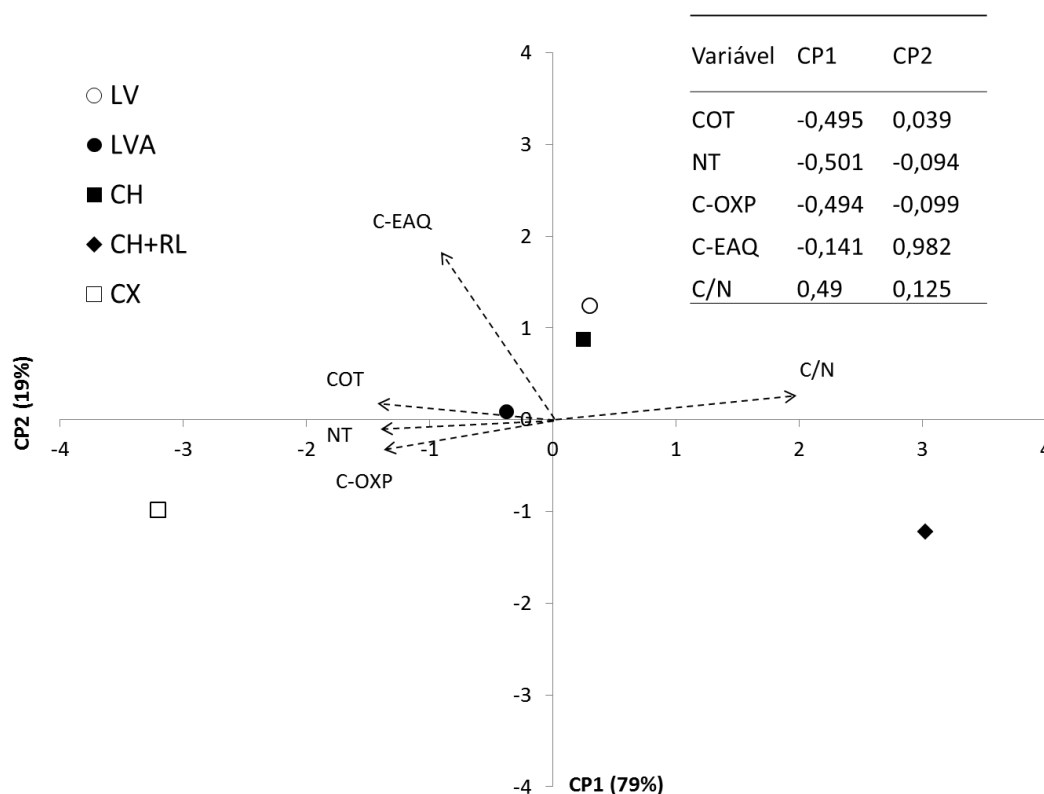


Figura 10: ACP realizada com as variáveis analisadas na camada de 0-10 cm utilizando as médias calculadas por classe de solo.

*COT = Carbono Orgânico Total; NT = Nitrogênio total; C-OXP = Carbono extraído por permanganato; C-EAQ = Carbono extraído por água quente; C/N = Relação C/N.

*LV = Latossolo Vermelho; LVA = Latossolo Vermelho Amarelo; CH = Cambissolo Húmico; CH+RL = Cambissolo Húmico + Neossolo Litólico; CX = Cambissolo Háplico;

*CP1 = Componente principal 1; CP2 = Componente principal 2.

Dentre as classes de solos, o CX (Figura 10) foi classificado como o que apresentou os maiores valores de COT, C-OXP e NT, indicando que essas variáveis estão caminhando na mesma direção. Em contraste, o CH+ RL apresentou os menores valores para essas variáveis, o LVA foi classificado como intermediário e LV, CH foram classificados como intermediários que apresentaram maiores conteúdos de C-EAQ. O fato de LV, LVA e CH apresentarem-se semelhantes para todas as variáveis medidas e para a produtividade de culturas (Tabela 5), pode indicar que as condições físicas nestas três classes de solo são semelhantes.

7.3 ESTRATIFICAÇÃO DOS COMPARTIMENTOS DE COT

A relação de estratificação (RE) considerando as camadas de 0-10 cm e 20-40 cm seguiram a ordem: CH > LV > CX > LVA > CH+RL (Tabela 7). A maior RE observada em CH está relacionada ao horizonte A Húmico e a RE para o C-OXP foi menor em CH+RL, o que deve ser reflexo da menor produtividade de culturas nos Cambissolos (Figura 8 e Figura 9). Para C-EAQ, a ordem observada foi CH > CH+RL = LVA > CX > LV, indicando que o CH e CH+RL apresentam menor quantidade de biomassa microbiana em profundidade comparada com a camada superior. Isto pode ser devido à formação de ambiente anaeróbico restringindo a maior expressão da comunidade microbiana (CAMARGO, 1999; WANSHNONG et al., 2013).

Tabela 6: Relações de estratificação entre as camadas de 0-10 cm e 20-40 cm para as variáveis: concentração de COT e do C presente nos compartimentos lábeis, concentração de N e relação C/N do solo por classe de solo.

Solo	Relação de estratificação (0-10 cm / 20-40 cm)					n [§]
	COT	NT	C-OXP	C-EAQ	C/N	
LV	1,47	1,79	1,35	1,36	0,82	19,0
LVA	1,41	1,64	1,36	1,69	0,80	28,0
CH	1,56	1,96	1,34	1,72	0,79	31,0
CH+RL	1,37	1,53	1,28	1,69	0,91	9,0
CX	1,42	1,73	1,36	1,44	0,81	10,0

[§] refere-se ao número de observações de cada variável; COT = Carbono Orgânico Total; NT = Nitrogênio total; C-OXP = Carbono extraído por permanganato; C-EAQ = Carbono extraído por água quente; C/N = Relação C/N. LV = Latossolo Vermelho; LVA = Latossolo Vermelho Amarelo; CH = Cambissolo Húmico; CH+RL = Cambissolo Húmico + Neossolo Litólico; CX = Cambissolo Háplico.

7.4 EFEITO DA SUCESSÃO DE CULTURAS

O efeito da sucessão de culturas nos compartimentos de COT foi observado nas concentrações de COT (Tabela 8).

Tabela 7: Concentrações totais de COT e de C presente nos compartimentos lábeis, concentração de N e relação C/N do solo por profundidade amostrada e período que a área se encontra dentro da escala de sucessão de culturas.

Profundidade	Sucessão	COT	NT	C-OXP	C-EAQ	C/N
cm		g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	
0-10	S1	37,4 ±7,9	0,24 ±0,1	4,11 ±0,7	0,78 ±0,5	16,7 ±4,4
	S2	33,3 ±9,6	0,23 ±0,1	4,37 ±0,6	0,33 ±0,2	14,8 ±3,1
	S3	39,2 ±10,7	0,27 ±0,1	4,87 ±1,2	0,65 ±0,3	15,4 ±2,9
10-20	S1	33,3 ±8,0	0,19 ±0,1	3,59 ±0,6	0,63 ±0,4	19,6 ±6,3
	S2	28,8 ±9,5	0,19 ±0,1	3,94 ±0,6	0,26 ±0,1	16,5 ±6,2
	S3	34,3 ±10,7	0,21 ±0,1	4,12 ±1,0	0,50 ±0,3	17,6 ±4,9
20-40	S1	26,2 ±6,3	0,14 ±0,01	3,09 ±0,5	0,52 ±0,4	20,6 ±5,6
	S2	21,3 ±7,7	0,13 ±0,01	3,26 ±0,6	0,19 ±0,1	16,3 ±4,2
	S3	27,1 ±7,9	0,15 ±0,1	3,56 ±0,8	0,39 ±0,2	20,4 ±7,7
40-70	S1	17,6 ±6,3	0,08 ±0,01	2,56 ±0,5	0,37 ±0,3	24,5 ±12,2
	S2	16,2 ±7,4	0,10 ±0,01	2,76 ±0,4	0,13 ±0,1	16,5 ±4,2
	S3	19,7 ±7,8	0,10 ±0,01	2,95 ±0,7	0,31 ±0,2	22,8 ±8,4
70-100	S1	13,2 ±5,3	0,06 ±0,01	2,41 ±0,5	0,33 ±0,4	23,7 ±11,2
	S2	13,2 ±7,6	0,08 ±0,01	2,64 ±0,4	0,10 ±0,1	17,2 ±6,4
	S3	15,0 ±5,0	0,07 ±0,01	2,73 ±0,7	0,23 ±0,2	26,1 ±11,5

*COT = Carbono Orgânico Total; NT = Nitrogênio total; C-PERM = Carbono extraído por permanganato; C-EAQ = Carbono extraído por água quente; C/N = Relação C/N.

*S1 = Trigo/Soja; S2 = Trigo/Soja; S3 = Aveia/Milho.

O C-OXP o foi maior em S3 (Tabela 8), isto provavelmente é o resultado da maior adição de fitomassa pela cultura do milho. Esta variação no compartimento mais lábil do COT está de acordo com Blair et al., (1995) que relatou que as alterações no C-lábil à curto prazo poderiam refletir o manejo do agro-ecossistema, mais recentemente isto também foi relatado por Culman et al., (2012). As variações do C-OXP observadas na camada de 10-20 cm devem ser uma consequência da decomposição do sistema radicular das culturas ou da rizodeposição.

O maior valor de NT em S3 (Tabela 8) pode ser devido à sucessão aveia/milho. Apesar da diferença observada ser menor que o desvio padrão, grande parte do N adicionado na cultura do milho pode ficar imobilizado na palhada sendo posteriormente liberado para o solo. Alguns autores relataram que o milho exporta cerca de 75% do N absorvido pelos grãos, permanecendo o restante na palhada (COELHO e FRANÇA, 2006). Como a palhada do milho apresenta uma relação C/N alta – Silva et al. (2009) relataram

cerca de 50:1 aos 60 dias após a semeadura – e relações maiores de 30:1 favorecem a imobilização de N no solo (MIRANDA, 2002), este N pode ser observado em S3.

A concentração de C-EAQ apresentou a seguinte ordem: $S1 > S3 > S2$ em todas as profundidades. Na camada de 0-10 cm, isto pode ser devido à decomposição da palhada com relação C/N mais alta proveniente do milho e da aveia em S3. Na camada 10-20 cm pode ser o resultado da decomposição do sistema radicular, já que grande parte do aporte de COT proveniente das culturas do milho e aveia provêm das raízes. Santos et al. (2011) estimaram esta quantidade em 28%. A relação C/N do solo foi menor em S3, após duas sucessões trigo/soja, o que pode ser explicado pelo fato das leguminosas apresentarem menores relações C/N.

7.5 MAPAS DOS COMPARTIMENTOS DE COT

O conjunto de mapas é o resultado do balanço entre a adição de fitomassa e a decomposição da mesma (Figura 11). Os mapas de COT e de C-OXP são semelhantes na maioria dos talhões. Em alguns talhões com predominância de Cambissolos e Neossolos, como nos talhões centrais da fazenda, os conteúdos de COT não variaram da mesma maneira que o C-OXP. Isto pode ser um indicativo de que estas áreas apresentam altos conteúdos de COT devido à dificuldade de oxidação do C. Esta dificuldade de oxidação pode ser devida ao excesso ou falta de umidade no solo durante períodos críticos.

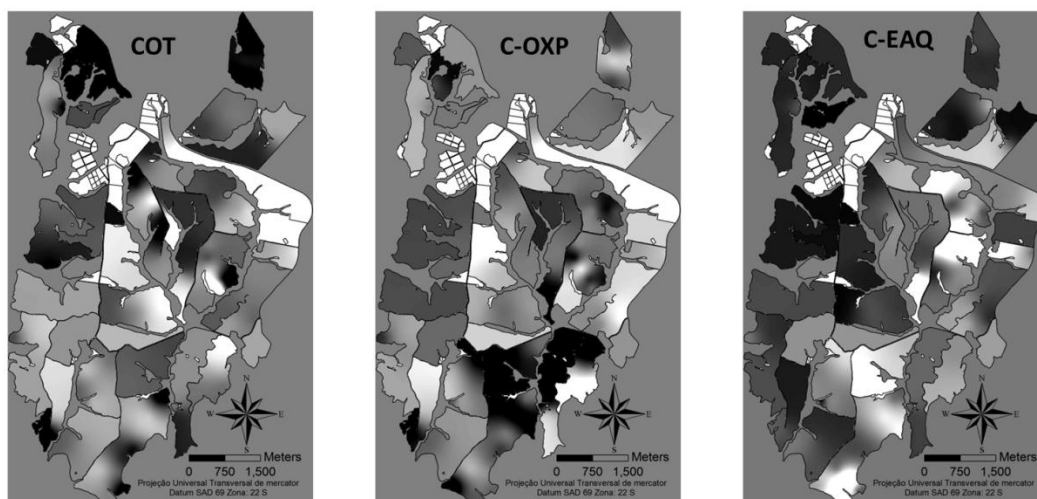


Figura 11: Espacialização das variáveis analisadas ajustadas por modelos “spline”.

*Áreas mais claras correspondem à conteúdos maiores. Os talhões completamente em branco correspondem a “sem informação”.

*COT = Carbono Orgânico Total; C-OXP = Carbono extraído por permanganato; C-EAQ = Carbono extraído por água quente.

8. Conclusões

O COT variou de acordo com o balanço entre a adição de fitomassa ao solo e a decomposição da MO pela biomassa microbiana. Tanto o C-OXP quanto o C-EAQ variaram em função da sucessão de culturas, pois o “turnover time” desses compartimentos é menor. O COT foi maior nos Latossolos devido à maior adição de fitomassa associado ao maior conteúdo de argila, mas também foram observados altos conteúdos nos Cambissolos, pela dificuldade de oxidação do C devido a formação de ambientes anaeróbicos durante alguns períodos de tempo. Pesquisas futuras podem ajudar a confirmar estas hipóteses.

9. Capítulo 2: Relações entre os compartimentos de carbono orgânico do solo e a produtividade de culturas no sistema plantio direto de longa duração

Resumo: Os benefícios do acúmulo de C orgânico total (COT) na qualidade do solo são bem conhecidos. Entretanto, ainda são escassas as informações relacionando o efeito direto do C na produção das culturas porque ela é restringida pelo fator mais limitante em cada situação específica. O objetivo deste estudo foi analisar a relação entre os compartimentos de COT e a produtividade de soja, milho e trigo em escala da paisagem em uma fazenda na região dos Campos Gerais do Paraná. Foram coletadas amostras deformadas nas principais classes de solo da fazenda em diferentes posições nas vertente. Foram analisados o COT, o C das frações lábeis (extraído por permanganato de potássio - C-OMP, e por água quente - C-EAQ) e calculados o índice de manejo de C (IMC) e o índice de resiliência do solo (IRS) para relacionar com a produtividade de soja, milho, e trigo e com as variáveis químicas do solo de cada ponto de coleta. Os dados foram analisados por meio de uma análise de componentes principais (ACP) e foram ajustadas regressões entre a produtividade das culturas e as outras variáveis. As produtividades de soja e trigo apresentaram uma relação positiva com o COT e com o nitrogênio total (NT). A produtividade de milho apresentou uma relação positiva com o C-EAQ. Os efeitos positivos do COT sobre a agregação do solo e a capacidade de troca de cátions podem explicar as relações observadas para a soja e o trigo, enquanto a mineralização do N presente na matéria orgânica do solo pode auxiliar a explicar a relação observada para o milho. Na regressão ajustada entre os compartimentos de C e a produtividade de trigo, o COT e o NT foram as variáveis que mais contribuíram, e dentre as variáveis químicas, o Ca foi a variável que mais contribuiu para explicar as variações na produtividade.

Palavras Chave: Carbono Orgânico Total; Produtividade de Culturas; Sistema Plantio Direto.

Relations between the soil organic carbon pools and crop yield in long term no-till system

Abstract: The benefits of the total organic C (TOC) accumulation in soil quality are well known. However, there is still little information relating the direct effect of soil C in crop yield. As the crops yield is restricted by the most limiting factor to every culture and situation specifically, it's not possible to generalize results. The aim of this study was to analyze the relationship between the TOC pools and yield of soybean, corn and wheat on a farm in the Campos Gerais region, in Paraná state. Deformed samples were collected in all major soil types on the farm at all landscape positions. TOC, permanganate oxidized C (OXP-C) and hot water extracted C (HWE-C) were analyzed, was calculated the C management index (CMI) and the soil resilience index (SRI) to relate with the yield of soybean, corn and wheat and with the chemical soil variables related to the sampling points. Data were analyzed through a principal components analysis (PCA) and regressions between crop yields and other variables were adjusted. The yield of soybean and wheat show a positive relationship with the TOC and the total N (TN). The corn yield showed a positive relationship with the HWE-C. The positive effects of TOC on soil aggregation and cation exchange capacity can explain the observed relationships for soybeans and wheat and organic N mineralization can help to explain the relationship observed in corn. In adjusted regression, of the C pools and the wheat yield, the TOC and the TN was the variables that contributed most and of the chemical variables the Ca were the variable that contributed most to explain variations in wheat yield.

Key Words: Total Organic Carbon; Crop Yield; No-Till System.

10. Introdução

Os benefícios do acúmulo de COT na qualidade do solo são bem conhecidos (LAL, 2004; LAL, 2008). Entretanto, ainda são escassas as informações relacionando o efeito direto do C na produção das culturas, desencadeando ainda discussão e incertezas.

Informações pioneiras foram reportadas de experimentos seculares realizados em Askov e Rothamsted no qual verificaram a relação entre os incrementos na produtividade das culturas relacionados com o aumento da concentração de C (CHRISTENSEN e JOHNSTON, 1997). Atribuíram estes incrementos à melhoria na qualidade do solo decorrente da maior agregação e do aumento no conteúdo de N. Diversos autores também estudaram estas relações. MacCarthy et al. (2009) relataram que o declínio na produtividade de sorgo (*Sorghum bicolor* L.), observado em uma região semiárida de Ghana, estava relacionado com o decréscimo do conteúdo de COT. Na mesma linha, Zhang et al. (2009) relataram ganhos na produtividade de trigo (*Triticum aestivum* L.) e milho (*Zea mays* L.) em regiões altas da China, relacionados com incrementos na concentração de COT, e também com o aumento nos teores de N e P nos solos. Recentemente, Sá et al. (2014) relataram que as produtividades de trigo (*Triticum aestivum* L.) e soja (*Glycine max* L.) se relacionaram positivamente com os estoques de COT na região dos Campos Gerais do Paraná. Porém, nem sempre efeitos positivos são verificados, Ogle et al. (2012) realizaram uma meta análise utilizando muitos resultados publicados e verificaram que o SPD resultou em declínio nas produtividades de milho (*Zea mays* L.) e trigo (*Triticum aestivum* L.) em regiões frias dos EUA. Como a produtividade de culturas é restringida pelo fator mais limitante, efeitos negativos do acúmulo do COT, como a diminuição da temperatura do solo, podem gerar tais resultados. Por outro lado, o acúmulo de COT depende do aporte de fitomassa ao solo, que geralmente é maior em locais onde a produtividade das culturas é elevada, sendo esta também condicionada por diversos fatores. Esta pode ser uma das razões pelas quais o conteúdo de COT geralmente não é considerado nos modelos de simulação de produtividade de culturas, como o CROPWAT desenvolvido pela Food and Agriculture Organization (FAO), e o CERES-MAIZE desenvolvido pela Michigan State University (MSU) e United States Department of Agriculture (USDA).

Visando aprimorar as pesquisas sobre estas relações, algumas alternativas foram apresentadas, baseadas principalmente no estudo dos compartimentos do COT e no cálculo de índices. Blair et al. (1995) propôs o IMC, o qual visa acessar a capacidade dos sistemas de manejo na promoção da qualidade do solo, e tem sido utilizado com sucesso em alguns trabalhos (VIEIRA et al., 2007; CONCEIÇÃO et al., 2014). Culman et al. (2013) realizaram um trabalho no estado do Michigan (EUA) e relataram que o C-OMP apresentou correlação com a produtividade de milho (*Zea mays* L.). Esses autores atribuíram as correlações entre o N e o C-Lábil do solo à mineralização do N durante o desenvolvimento do milho. Em outra situação, D'Hose et al. (2014) incluíram o C-EAQ como um índice de qualidade do solo (IQS), o qual, por sua vez, apresentou relações positivas com a produtividade de batata (*Solanum tuberosum* L., $R^2 = 0,46$) e couve de bruxelas (*Brassica oleracea* L., $R^2 = 0,4$).

Baseado nestas premissas, o objetivo deste trabalho foi analisar a relação espacial e pontual entre os índices IMC e IRS, os compartimentos de COT e a produtividade de milho (*Zea mays* L.), soja (*Glycine max* L. Merrill) e trigo (*Triticum aestivum* L.) em escala de fazenda na região do Campos Gerais do Paraná. Esta hipótese foi concebida partindo-se do princípio de que tanto os índices como os compartimentos de COT irão se correlacionar positivamente com a produtividade de culturas em decorrência dos efeitos benéficos sobre a qualidade do solo. Espera-se proporcionar melhor entendimento das relações entre o COT e a produtividade de culturas na região do Campos Gerais do Paraná e destacar as variáveis que apresentam potencial para serem utilizadas em modelos de predição da produtividade de culturas.

11. Material e métodos

A localização da área em que o estudo foi realizado, a metodologia utilizada na amostragem e as análises realizadas referentes aos compartimentos de C e N estão descritas no primeiro capítulo (p.25 a 33). Neste capítulo será apresentada a metodologia referente ao estudo do efeito do C sobre a produtividade de culturas.

11.1 BASE DE DADOS DA FAZENDA PAIQUERÊ

A base foi constituída com o monitoramento temporal da fertilidade do solo, realizado por zonas de amostragem levando-se em conta o talhão operacional da fazenda, a classe de solo e a posição na paisagem. Este é realizado em um terço da fazenda a cada dois anos, de modo que o mesmo talhão só é amostrado novamente a cada 6 anos. Como as amostras de solo para esse estudo foram coletadas em maio de 2013, foram utilizados os dados provenientes do monitoramento da fertilidade do solo realizado no mesmo ano.

Os dados utilizados foram: Fósforo (P, mg/kg); Potencial hidrogeniônico (pH); Hidrogênio mais Alumínio (H+Al, cmol/dm³); Cálcio (Ca, cmol/dm³); Magnésio (Mg, cmol/dm³); Potássio (K, cmol/dm³); Soma de bases (SB, cmol/dm³); Capacidade de Troca de Cátions efetiva do solo (CTC ef., cmol/dm³); Teor de argila (Argila, g/Kg); Teor de Silte (Silte, g/Kg); Teor de areia (Areia, g/Kg).

Também foram obtidas da base de dados da fazenda, a variação espacial das produtividades de soja, milho e trigo. O monitoramento foi realizado através de sensores instalados nas colhedeiras da marca John Deere, utilizando sistemas GPS integrados Greenstar. As informações foram agrupadas e processadas com o auxílio do software Apex.

11.2 ÍNDICES CALCULADOS

Para o acesso à variação espacial da labilidade do COT foi calculado o índice de manejo de carbono (IMC), de acordo com a metodologia proposta por Blair et al. (1995).

O cálculo do IMC foi realizado da seguinte maneira:

$$\text{"Carbon pool index" (CPI)} = \frac{\text{Carbono total da amostra (mg g}^{-1}\text{)}}{\text{Carbono total da área de referência (mg g}^{-1}\text{)}} = \frac{CT \text{ amostra}}{CT \text{ referência}}$$

$$\text{Labilidade do carbono (L)} = \frac{C \text{ na fração oxidada por KMnO}_4}{C \text{ remanescente não oxidado por KMnO}_4} = \frac{C_L}{C_{NL}}$$

$$\text{Índice de labilidade (IL)} = \frac{\text{Labilidade do carbono no solo amostrado}}{\text{Labilidade do carbono na área de referência}}$$

$$\text{Índice de manejo de carbono (IMC)} = \text{"C pool Index"} \times \text{Índice de labilidade} \times 100 = CPI \times IL \times 100$$

O IRS foi calculado de acordo com a metodologia proposta por Herrick e Wander (1997) descrita resumidamente a seguir:

$$\text{Taxa de Depreciação} = (COT_{\text{Área de referência superior}} - COT_{\text{área de referência inferior}}) / \text{tempo desde a conversão da área}$$

$$\text{Taxa de Recuperação} = (COT_{\text{Área analisada}} - COT_{\text{área de referência inferior}}) / \text{tempo desde a adoção do sistema de manejo}$$

$$\text{Índice de resiliência do solo} = \text{Taxa de depreciação} / \text{Taxa de recuperação}$$

Foram consideradas como as referências superior e inferior, os pontos amostrados que apresentaram a maior e a menor concentração de COT, respectivamente.

11.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Como os dados referentes à variação espacial da produtividade das culturas provinham de materiais genéticos diferentes, a produtividade foi padronizada diminuindo-se ou somando-se os desvios em relação às médias para o ajuste dos modelos.

Para análise das relações entre IMC, IRS, COT e C-OXP e a produtividade de culturas foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson entre estas variáveis. Os coeficientes significativos a mais de 90% de probabilidade ($P < 0,1$) foram consideradas.

Para resumir as informações e facilitar a sua interpretação foram ajustadas ACPs com as variáveis IMC, COT, NT, C-OXP, C-EAQ, relação C/N do solo e as produtividades de soja, trigo e milho, respectivamente.

Para acessar as relações entre as variáveis analisadas e a produtividade de culturas foram ajustados modelos de regressão com componentes principais (RCP). Esta técnica foi escolhida porque elimina os problemas relativos à autocorrelação entre as variáveis e homocedasticidade das variâncias (variâncias homogêneas). O único modelo que apresentou significância foi o ajustado com a produtividade de trigo. As etapas do ajuste dos modelos foram as seguintes: Primeiramente analisa-se a relação entre as variáveis e a produtividade de culturas através de um “Diagrama de Draftsman”; desta forma foi possível eliminar variáveis que apresentaram relações não-lineares que não seriam captadas na construção dos componentes principais e variáveis que não apresentaram relação com a produtividade. Após a aplicação da ACP, foram selecionados os três primeiros componentes principais e elaborou-se uma regressão linear múltipla entre a produtividade da cultura analisada e os componentes principais. Definiu-se como linha de corte para a discussão das variáveis, a contribuição de 10% para o componente principal.

Para a realização das análises de correlação das ACPs e do ajuste dos modelos de regressão (RCP e simples), foi utilizado o software R v. 2.15.2, e para a organização das informações georreferenciadas, foi utilizado o software ArcGIS v. 10.2.1.

12. Resultados e Discussão

12.1 CORRELAÇÕES ENTRE OS COMPARTIMENTOS DE COT E A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS

As relações observadas entre os compartimentos de COT e as produtividades das culturas foram diferentes para soja, trigo e milho (Tabela 9). A produtividade de soja apresentou correlação positiva com COT, IRS e C-OXP. E a produtividade de trigo com COT e IRS. A relação positiva entre o COT e as produtividades, refletida no IRS pela maneira como este foi calculado, pode ser explicada pela série de benefícios que o acúmulo de COT proporciona. Vários autores destacaram características físicas do solo como a capacidade de infiltração e retenção de água no solo (JAGADAMMA et al. 2008; FRANCHINI et al. 2012; SANTI et al. 2012), e químicas, como a mineralização de N e a disponibilidade de K (JAGADAMMA et al. 2008; SANTI et al. 2012; CULMAN et al. 2013) como as principais responsáveis pelo incremento da produtividade de culturas em SPD.

Tabela 8: Coeficientes de correlação de Pearson entre os índices calculados, os compartimentos de COT e as produtividades de trigo, milho e soja.

	Todas as cultivares					
	Trigo		Milho		Soja	
IMC	-0,42	*	0,21	ns	-0,03	ns
IRS	0,43	*	-0,07	ns	0,22	.
COT	0,43	*	-0,07	ns	0,23	.
C-OXP	0,31	ns	-0,36	*	0,22	.

*IMC = Índice de Manejo de Carbono; IRS = Índice de Resiliência do Solo; COT = Carbono Orgânico Total; C-PERM = Carbono extraído por permanganato.

* Nível de Significancia * = $P < 0.05$; ' = $P < 0.1$; ns = Não significativo a $P < 0.1$.

A relação positiva entre o C-OXP e a produtividade de soja pode ser devida à mineralização de nutrientes. Embora a cultura da soja tenha autonomia pela fixação biológica de N, os nutrientes ciclados do processo de mineralização podem ter contribuído para o aumento da produtividade.

A correlação negativa observada entre o IMC e a produtividade de trigo é uma contradição com a correlação positiva observada com o COT (Tabela 9). Alguns autores relataram uma influência negativa do acúmulo de COT na produtividade de trigo causada pela diminuição da temperatura do solo (OGLE et al. 2012), já que o trigo é cultivado no inverno.

12.2 ANÁLISES DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Não foram verificadas diferenças entre as classes de solo analisadas na ACP (Figura 12), o que pode ser devido à homogeneização das variáveis químicas do solo ao longo de 30 anos sob SPD.

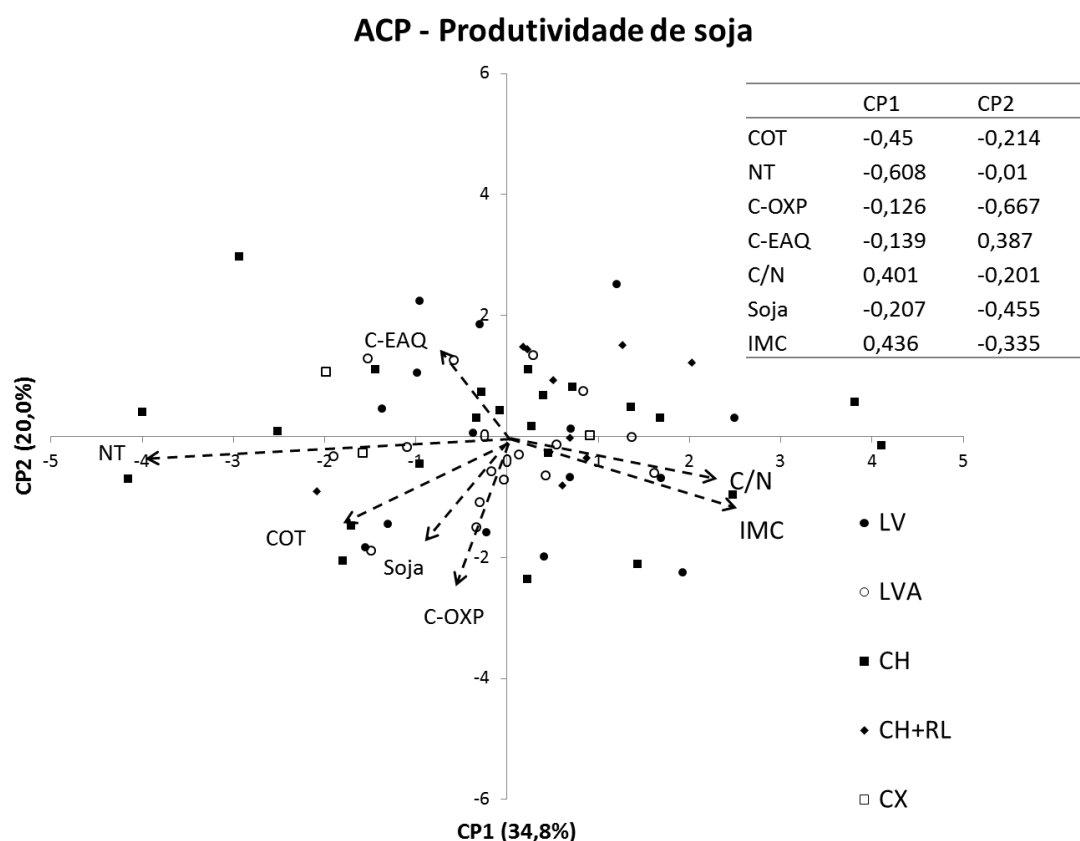


Figura 12: ACP realizada com as variáveis analisadas e a produtividade de soja.

*Soja = Produtividade de soja; COT = Carbono Orgânico Total; NT = Nitrogênio total; C-OMP = Carbono extraído por permanganato; C-EAQ = Carbono extraído por água quente; C/N = Relação C/N.

*LV = Latossolo Vermelho; LVA = Latossolo Vermelho Amarelo; CH = Cambissolo Húmico; CH+RL = Cambissolo Húmico + Neossolo Litólico; CX = Cambissolo Háplico.

*CP1 = Componente principal 1; CP2 = Componente principal 2.

O CP1 explicou 35% e o CP2 20% de toda a variância dos dados (Figura 12). Assim, a ACP resumiu 65% da variância total. A produtividade de soja foi positivamente correlacionada com COT, NT e C-OMP, e apresentou correlação nula com C-EAQ, com a relação C/N do solo e com o IMC. A relação positiva com o NT pode ser reflexo da associação do N com o COT, já que a associação entre as raízes de soja e o *Bradyrhizobium sp.* – que garante o suprimento de N para a cultura – é mais eficiente quando o solo apresenta baixos teores de N disponível para as plantas (HUNGRIA et al., 2001). A associação com *Bradyrhizobium sp.* também ajuda a explicar a relação nula com o C-EAQ, já que a soja não é dependente da atividade da biomassa microbiana para a assimilação de N. A correlação nula entre a produtividade de soja e o IMC indica que os efeitos benéficos do C do solo são melhor refletidos pelo COT.

Também não foram observadas diferenças entre as classes de solos na ACP realizada com a produtividade de trigo (Figura 13). O CP1 explicou 45% e o CP2 19% de toda a variância dos dados, totalizando 64%. As relações entre a produtividade de trigo e as variáveis analisadas seguiram o mesmo padrão observado na Figura 12, diferindo nas variáveis relação C/N do solo e IMC, as quais foram negativamente correlacionadas com a produtividade de trigo.

A variável mais correlacionada com a produtividade de trigo foi o NT, o que ajuda a explicar a correlação negativa entre a produtividade de trigo e a relação C/N do solo, pois relações C/N menores implicam em menores conteúdos de N no solo (MIRANDA, 2002). A correlação negativa com o IMC, da mesma forma que para a soja, indica que os efeitos benéficos do C do solo são melhor refletidos pelo COT.

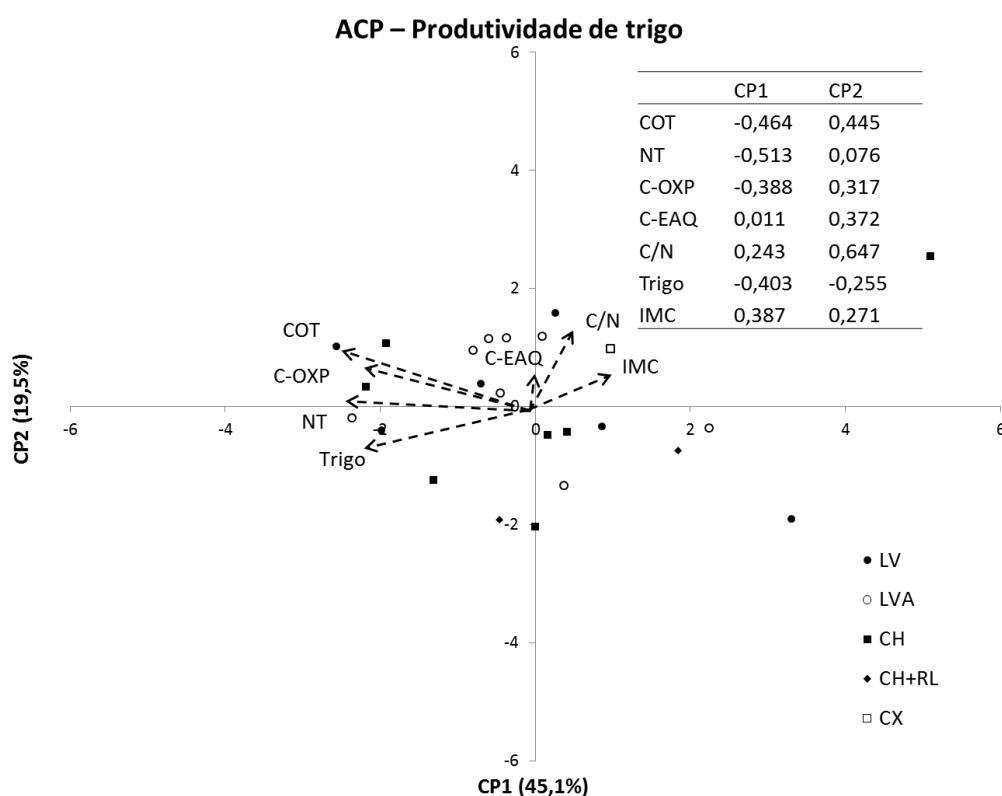


Figura 13: ACP realizada com as variáveis analisadas e a produtividade de trigo.

*Trigo = Produtividade de trigo; COT = Carbono Orgânico Total; NT = Nitrogênio total; C-OXP = Carbono extraído por permanganato; C-EAQ = Carbono extraído por água quente; C/N = Relação C/N.

*LV = Latossolo Vermelho; LVA = Latossolo Vermelho Amarelo; CH = Cambissolo Húmico; CH+RL = Cambissolo Húmico + Neossolo Litólico; CX = Cambissolo Háplico.

*CP1 = Componente principal 1; CP2 = Componente principal 2.

Também não foram verificadas diferenças entre as classes de solo na ACP realizada com a produtividade de milho (Figura 14). O CP1 explicou 39% da variância total e o CP2 21%, totalizando 60% da variância total explicada pela ACP. As relações observadas entre a produtividade de milho e as variáveis foram diferentes das observadas para a soja e para o trigo. A produtividade de milho correlacionou-se positivamente com o IMC, a relação C/N do solo e o C-EAQ, negativamente com o C-OMP, e não apresentou correlação com o COT e o NT.

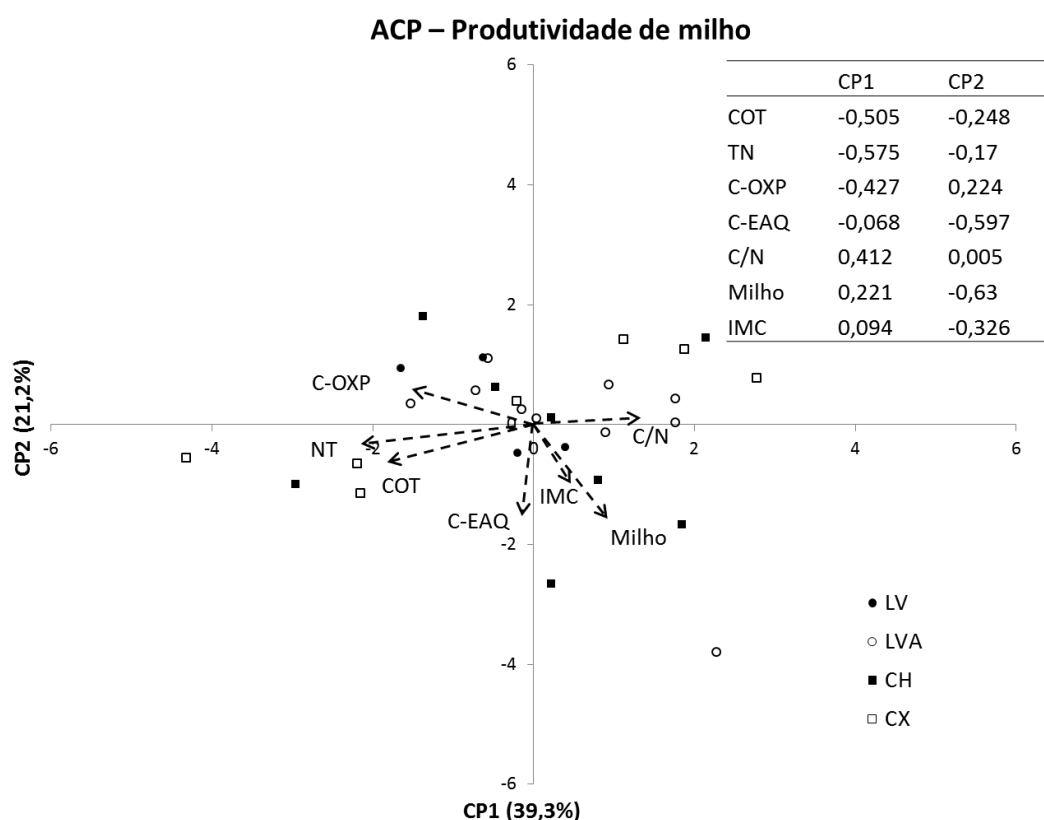


Figura 14: ACP realizada com as variáveis analisadas e a produtividade de milho.

*Milho = Produtividade de milho; COT = Carbono Orgânico Total; NT = Nitrogênio total; C-OMP= Carbono extraído por permanganato; C-EAQ = Carbono extraído por água quente; C/N = Relação C/N.

*LV = Latossolo Vermelho; LVA = Latossolo Vermelho Amarelo; CH = Cambissolo Húmico; CX = Cambissolo Háplico.

*CP1 = Componente principal 1; CP2 = Componente principal 2.

A correlação positiva entre a produtividade de milho e o C-EAQ (Figura 15) pode ser devida à mineralização de N orgânico, disponibilizando o nutriente para o milho. A relação observada entre a produtividade de milho, o COT e o NT indicam que o acúmulo de COT pode não resultar em aumentos na produtividade. Franchini et al. (2012) reportaram o mesmo resultado em um trabalho realizado em Londrina (PR) e o atribuíram

à maior imobilização de N na MOS em SPD de longa duração. Nesse estudo, observou-se que produtividades elevadas devem estar mais relacionadas com o C-EAQ. A produtividade de milho apresentou correlação negativa com o C-OXP, embora o contrário tenha sido observado por Culman et al. (2013), quais verificaram correlação positiva entre a produtividade de milho e C-OXP. As correlações nulas entre produtividade de milho e COT e NT e a correlação negativa com C-OXP podem também ser devidas ao menor número de dados de produtividade de milho disponíveis – pois S1 e S2 compreendem soja e trigo, e somente S3 compreende o milho. A relação positiva entre a produtividade de milho e o IMC pode ser um reflexo da mineralização de nutrientes e indica que esta é uma variável que deve ser mais explorada em trabalhos futuros.

12.3 MODELAGEM DO EFEITO DO SOLO NA PRODUTIVIDADE DE CULTURAS

Os ajustes dos modelos de regressão múltipla com os componentes principais (RCP) foram significativos somente para a cultura do trigo (Tabela 10).

A produtividade de trigo se relacionou positivamente com as seguintes variáveis (os números entre parênteses indicam a contribuição da variável para o primeiro componente e único a apresentar significância): CTC efet. (12,32%) > NT (11,97%) > Argila (11,63%) > COT (10,50%) > Ca (10,37%) > SB (10,11%) > H+Al (5,48%) > Mg (4,97%) > C-OXP (2,07%) > C-EAQ (1,80%) > K (1,66%) > P (0,02%).

Tabela 9: Modelo de regressão múltipla com os três primeiros componentes principais, considerando as variáveis mensuradas e obtidas da base de dados da Fazenda Paiquerê como preditoras da produtividade padronizada de trigo.

Variedade	Modelo de regressão	Componentes principais															Ajuste do modelo			
		COT	NT	C-OXP	C-EAQ	P	pH	H+Al	Ca	Mg	K	SB	CTC Ef.	Argila	Areia	R-Ajustado	P	n		
Trigo	Intercepto	3123,32	***																	
	CP1	-105,66	*	-0,324	-0,346	-0,144	-0,134	-0,013	0,141	-0,234	-0,322	-0,223	-0,129	-0,318	-0,351	-0,341	0,39	0,08	< 0,2	22,00
	CP2	-12,43	ns	-0,221	-0,148	-0,325	0,214	0,32	0,258	-0,254	0,319	0,369	-0,211	0,333	0,281	-0,236	0,127			
	CP3	16,54	ns	-0,024	-0,038	-0,071	-0,01	0,514	-0,596	0,477	-0,034	-0,081	-0,282	-0,064	0,08	-0,178	0,132			

*COT = Carbono Orgânico Total; NT = Nitrogênio total; C-OXP = Carbono extraído por permanganato; C-EAQ = Carbono extraído por água quente; P = Fósforo total; pH = Potencial de hidrogênio; H + Al = Hidrogênio + Alumínio; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; K = Potássio; SB = Soma de bases; CTC Ef. = Capacidade de troca de cátions efetiva.

*CP1 = Componente principal 1; CP2 = Componente principal 2; CP3 = Componente principal 3.

* Significância *** = $P < 0.001$ * = $P < 0.05$; ns = Não significativo a $P < 0.05$.

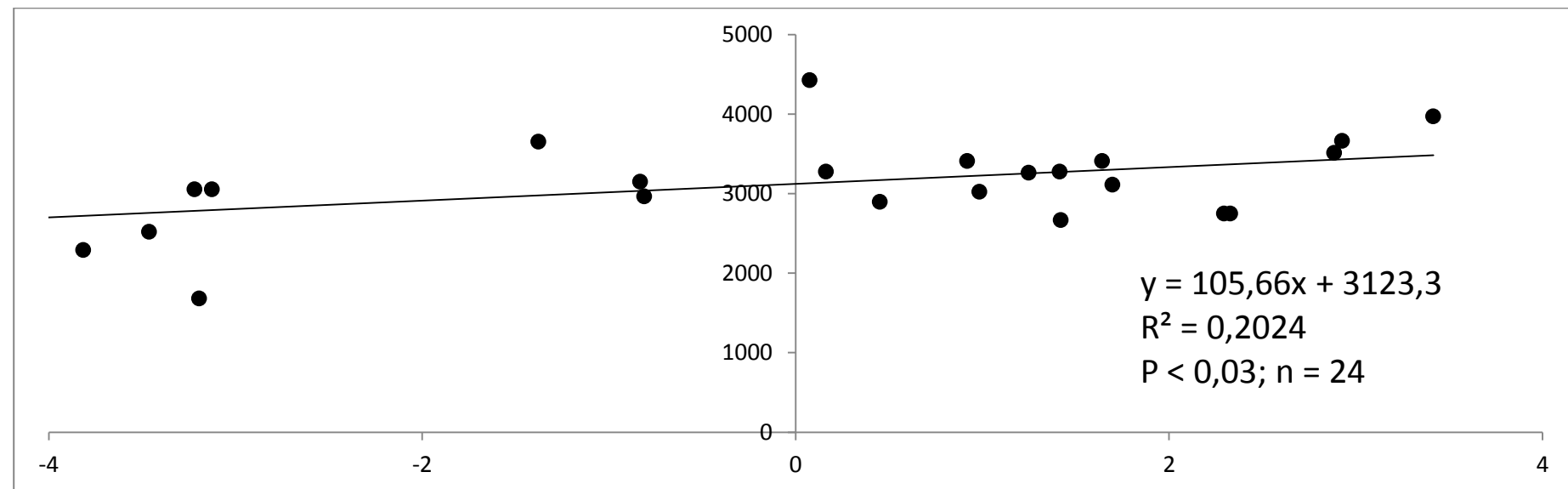


Figura 15: Regressão ajustada entre a produtividade de trigo padronizada (kg/ha) e o Componente Principal 1.

O modelo ajustado com o CP1 apresentou uma relação linear (Figura 15), sendo contrastante com os efeitos dos nutrientes na produtividade de culturas, que são ajustados por modelos quadráticos. Este comportamento pode ser consequência da transformação das variáveis em uma variável canônica, porque no procedimento, perde-se uma parte da variância total do conjunto de dados. Também pode indicar que o solo não está expressando todo o seu potencial na produtividade das culturas, ou que a elevação dos teores de alguns nutrientes possa contribuir positivamente para o aumento da produtividade. No ajuste do modelo de regressão simples (Figura 15) para cada aumento de uma unidade no CP1, o modelo ilustra um aumento de 105,7 kg/ha de trigo (os autovetores do CP1 foram multiplicados por -1 para facilitar a visualização). O R^2 baixo (0.2) pode ser devido ao efeito do clima, do material genético (mesmo que a produtividade tenha sido padronizada) e da disponibilidade de água no solo.

A elevada contribuição da CTC efetiva para o modelo reflete a capacidade do solo de reter nutrientes e liberá-los para as plantas. A elevada contribuição da argila pode ser explicada pela influência desta na CTC do solo e na formação dos agregados (SIX et al., 2002). A alta contribuição da SB representa os nutrientes presentes no solo, especialmente Ca, que a planta pode utilizar em seu metabolismo.

A elevada contribuição do NT indica que este nutriente deve estar sendo limitante para a produtividade das culturas na fazenda. Apesar dos valores elevados de COT, a mineralização do N depende da atividade da biomassa microbiana que variou entre os talhões em função da sucessão de culturas e de características físicas do solo, como a umidade. A contribuição do COT demonstra o efeito positivo deste sobre a produtividade de trigo. O COT refletiu mais os benefícios do acúmulo de C no solo do que a avaliação dos compartimentos C-OXP e C-EAQ, apesar deste último representar a biomassa microbiana, essencial para a mineralização de N que foi apontado como um nutriente limitante para a produtividade de trigo.

Outro nutriente que apresentou uma elevada contribuição foi o Ca, indicando que este também pode estar limitando a produtividade de trigo na fazenda. Em outros trabalhos, o K foi apontado como o principal nutriente responsável pela limitação da produtividade das culturas de milho, soja, trigo e aveia (JAGADAMMA et al. 2008; SANTI et al. 2012). A contribuição do P foi menor que dos demais nutrientes. Como os conteúdos de COT

foram elevados e o P orgânico pode representar até 90% do P presente no solo (ANGHINONI e BISSANI, 2004), os níveis deste nutriente devem estar adequados.

13. Conclusão

As produtividades de soja e trigo apresentaram correlação positiva com o conteúdo de COT e C-OMP, enquanto o milho se correlacionou positivamente com o IMC e C-EAQ. O conteúdo de COT e o NT foram as variáveis que mais explicaram a produtividade de trigo (dentre os compartimentos de COT analisados), seguida por C-OMP e C-EAQ. Isto demonstra o potencial desta variável para utilização nos modelos de previsão de produtividade do trigo. A variável química que mais explicou a variabilidade da produtividade de trigo foi o Ca, o que indica que estes nutrientes podem estar limitando a produtividade de trigo na Fazenda Paiquerê.

14. Conclusões gerais

Os compartimentos de COT apresentaram relações positivas com a produtividade das culturas confirmando nossas hipóteses. A variação espacial do conteúdo de COT em escala de fazenda pode ser explicada por variações na textura do solo e pelo maior aporte de fitomassa em algumas áreas; o conteúdo de C-EAQ também ajuda a explicar parte destas variações que foram refletidas na produtividade de culturas. Enquanto as produtividades de soja e trigo foram positivamente correlacionadas com o COT e com o C-OXP, o milho foi positivamente correlacionado com o IMC e com o C-EAQ. A maior dependência do milho à mineralização do N presente na MOS ajuda a explicar este resultado. O COT foi a variável que mais contribuiu para explicar a variação da produtividade de trigo, isso se deve aos efeitos positivos na formação dos agregados e no aumento da CTC do solo. Da mesma maneira que o COT influenciou a produtividade de trigo, esta também influenciou a variação dos conteúdos de C-lábil no solo. A variação do C-OXP e do C-EAQ aconteceu principalmente em função da sucessão de culturas, resultado do maior aporte de fitomassa em S3 e do maior aporte de fitomassa com baixa relação C/N em S1 e S2.

15. Referências bibliográficas

ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J. Acidity and Aluminum Speciation as Affected by Surface Liming in Tropical No-Till Soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.74, n.3, 2010.

AMADO, T. J. C.; RICE, C. W.; FABRIZZI, K.; NICOLOSO, R. S.; O Solo Agrícola e o Mercado Internacional de Carbono. Em: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo ecossistemas tropicais e subtropicais, 2º Ed. Porto Alegre, 2008.

ANGHINONI, I.; BISSANI, C. A. Fósforo e adubos fosfatados, Em: BISSANI, C. A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.; J.; CAMARGO, F. O. A. Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas. Porto Alegre, Ed. Gênese, 2004, p.117-138.

ARAÚJO, A. P.; TEIXEIRA, M. G. Variabilidade dos Índices de Colheita de Nutrientes em Genótipos de Feijoeiro e Suas Relações com a Produção de Grãos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2012, v.36, p.137-146.

BATJES, N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, v.47, p.151–163.

BEHLING, H. Late Quaternary vegetation, climate and fire history of the Araucaria forest and campos region from Serra Campos Gerais, Parana State (South Brazil). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1997, v.97, p.109–121.

BHARDWAJ, A. K.; JASROTIA, P.; HAMILTON, S. K.; ROBERTSON, G. P. Ecological management of intensively cropped agro-ecosystems improves soil quality with sustained productivity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, v.140, p.419–429.

BERNOUX, M.; CARVALHO, M. C. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brazil's Soil Carbon Stocks. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, v.66, p.888–896.

BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D. B.; LISLE, L. Soil Carbon Fractions Based on their Degree of Oxidation, and the Development of a Carbon Management Index for Agricultural Systems. *Australian Journal of Agriculture Research*, 1995, v.46, p.1459-66.

BORTOLON, E. S. O.; MIELNICZUK, J.; TORNQUIST, C. G.; LOPES, F.; BERGAMASCHI, H. Validation of the Century model to estimate the impact of agriculture on soil organic carbon in Southern Brazil. *Geoderma*, 2011, v.167, n.168, p.156–166.

CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; BARTH, G.; CORRÊA, J. C. L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. *European Journal of Agronomy*, 2008, v.28, p.57–64.

CAMARGO, F. A. O.; SANTOS, G. A.; ZONTA, E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. *Ciência Rural*, Santa Maria, 1999, v.29, n.1, p.171-180.

CERRI, C. E. P.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K.; KILLIAN, K.; COLEMAN, K.; BERNOUX, M.; FALLON, P.; POWLSON, D. S.; BATJES, N.; MILNE, E.; CERRI, C. C. Simulating SOC changes in 11 land use change chronosequences from the Brazilian Amazon with RothC and Century models. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, v.122, p.46–57.

CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; CERRO, C. C. Dinâmica da Matéria Orgânica do Solo na Amazônia. Em: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. *Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo ecossistemas tropicais e subtropicais*, 2º Ed. Porto Alegre, 2008.

CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; MAIA, S. M. F.; CERRI, C. E. P.; COSTA JUNIOR, C.; FEIGL, B. F.; FRAZÃO, L. A.; MELLO, F. F. C.; GALDOS, M. V.; MOREIRA, C. F.; CARVALHO, J. L. N. Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. *Scientia Agricola*, Piracicaba, Brazil, 2010, v.67, n.1, p.102-116.

CHABBI A, KÖGEL-KNABNER I, RUMPEL C. Stabilised carbon in subsoil horizons is located in spatially distinct parts of the soil profile. *Soil Biology Biochemistry*, 2009, v.41, p.256–271.

CHRISTENSEN, B. T.; JOHNSTON, A. E. Soil organic matter and soil quality – Lessons learned from long-term experiments at Askov and Rothamsted. Em: GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R. (Eds.) *Soil quality for crop production and ecosystem health*. Developments in soil science, v.25. Elsevier Science, 1997, p. 399-430.

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E. Nutrição e adubação de milho, EMBRAPA Milho e Sorgo, 2006, disponível em: http://xa.yimg.com/kq/groups/35137484/1237253435/name/nutricao_adubacao_milho.pdf. Acesso em: 10/10/2013.

COOKSON, W.; MURPHY, D.; ROPER, M. Characterizing the relationships between soil organic matter components and microbial function and composition along a tillage disturbance gradient. *Soil Biology Biochemistry*, 2008, v. 40, p. 763–777.

CONCEIÇÃO, P. C.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; SANTOS, D. C. Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. *Ciência Rural*, Santa Maria, 2014, v.44, n.5, p.794-800.

CORRÊA, A. N.; TAVARES, M. H. F.; URIBE-OPAZO, M. A. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e seus efeitos sobre a produtividade do trigo. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, 2009, v.30, n.1, p.81-94.

COSTA, F. S.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C. Emissão de Gases de Efeito Estufa em Agroecossistemas e Potencial de Mitigação. Em: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. *Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo ecossistemas tropicais e subtropicais*, 2º Ed. Porto Alegre, 2008.

CULMAN, S. W.; SNAPP, S. S.; FREEMAN, M. A.; SCHIPANSKI, M. E.; BENISTON, J.; LAL, R.; DRINKWATER, L. E.; FRANZLUEBBERS, A. J.; GLOVER, G. D.; GRANDY, A. S.; LEE, J.; SIX, J.; MAUL, J. E.; MIRKSY, S. B.; SPARGO, J. T.;

WANDER, M. M. Permanganate Oxidizable Carbon Reflects a Processed Soil Fraction that is Sensitive to Management. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, v.76, n.2.

CULMAN, S. W.; SNAPP, S. S.; GREEN, J. M.; GENTRY, L. E. Short- and Long-Term Labile Soil Carbon and Nitrogen Dynamics Reflect Management and Predict Corn Agronomic Performance. *Agronomy Journal*, 2013, v.105, n.2.

DAVIDSON, E. A.; LEFEBVRE, P. A. Estimating regional carbon stocks and spatially covarying edaphic factors using soil maps at three scales. *Biogeochemistry*, 1993, v.22, p.107-131.

D'HOSE, T.; COUGNON, M.; VliegHER, A.; VANDECASTEELE, B.; VIAENE, N.; CORNELIS, W.; BOCKSTAELE, E. V.; REHEUL, D. The positive relationship between soil quality and crop production: A case study on the effect of farm compost application. *Applied Soil Ecology*, 2014, v.75, p.189–198.

DJIGAL, D.; SAJ, S.; RABARY, B.; BLANCHART, E.; VILLENAVE, C. Mulch type affects soil biological functioning and crop yield of conservation agriculture systems in a long-term experiment in Madagascar. *Soil & Tillage Research*, 2012, v.118, p.11–21.

DON, A.; SCHUMACHER, J.; SCHERER-LORENZEN, M.; SCHOLTEN, T.; SCHULZE, E.; Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites — Implications for measuring soil carbon stocks. *Geoderma*, 2007, v.141, p.272–282.

EASTER, M.; PAUSTIAN, K.; KILLIAN, K.; WILLIAMS, S.; FENG, T.; AL-ADAMAT, R.; BATJES, N. H.; BERNOUX, M.; BHATTACHARYYA, T.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P.; COLEMAN, K.; FALLON, P.; FELLER, C.; GICHERU, P.; KAMONI, P.; MILNE, E.; PAL, D. K.; POWLSON, D. S.; RAWAJFIH, Z.; SESSAY, M.; WOKABI, S. The GEFSOC soil carbon modelling system: A tool for conducting regional-scale soil carbon inventories and assessing the impacts of land use change on soil carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, v.122, p.13–25.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, EMBRAPA solos, 2005.

FERREIRA, A. O.; AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. S.; SÁ, J. C. M.; FIORIN, J. E.; HANSEL, D. S. S.; MENEFEE, D. Soil carbon stratification affected by long-term tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, 2013, v.133, p.65–74.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TONON, B. C.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N.; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. *Field Crops Research*, 2012, v.137, p.178–185.

FRANZLUEBBERS, A. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil & Tillage Research*, 2002, v. 66, p. 95–106.

GARCÍA-ORENES, F.; MARUGÁN-CORONADO, A.; ZORNOZA, R.; SKOW, K. Changes in Soil Microbial Community Structure Influenced by Agricultural Management Practices in a Mediterranean Agro-Ecosystem. *Plos One*, 2013, v.8, n.11.

GERALDO, J.; ROSSIELO, R. O. P.; ARAÚJO, A. P.; PIMENTEL, C. Diferenças em Crescimento e Produção de Grãos Entre Quatro Cultivares de Milho Pérola. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 2000, v.35, n.7, p.1367-1376.

GHANI, A.; DEXTER, M.; PERROTT, K. W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. Soil Biology & Biochemistry, 2003, v. 35, p. 1231–1243.

GIL, S. V.; MERILES, J.; CONFORTO, C.; FIGONI, G.; BASANTA, M.; LOVERA, E.; MARCH, G. J. Field assessment of soil biological and chemical quality in response to crop management practices. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2008, v.25, p.439–448.

GIL - SOTRES. V.; MERILES, J.; CONFORTO, C.; FIGONI, G.; BASANTA, M.; LOVERA, E.; MARCH, G. J. Field assessment of soil biological and chemical quality in response to crop management practices. World Journal of Microbiology Biotechnolgy, 2005, v.25, p. 439–448.

GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; GONÇALVES, T. D.; MOREIRA, R. M.; MENDES, J. C. T.; GAVA, J. L. Mapeamento de solos e da produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*, com uso de sistema de informação geográfica. Scientia Forestalis, Piracicaba, 2012, v.40, n.94, p.187-201.

GUO, Y.; AMUNDSON, R.; GONG, P.; YU, Q. Quantity and Spatial Variability of Soil Carbon in the Conterminous United States. Soil Science Society of America Journal, 2006, v.70, p.590–600.

GUO, Z. L.; CAI, C. F.; LI, Z. X.; WANG, T. W.; ZHENG, M. J. Crop residue effect on crop performance, soil N₂O and CO₂ emissions in alley cropping systems in subtropical China. Agroforestry System, 2009, v.76, p.67–80.

HARTEMINK, A.E. Soil map density and a nation's wealth and income. Em: HARTEMINK, A.E., et al. Digital soil mapping with limited data. Springer, New York, 2008, p.53–66.

HE, X.; IZAURRALDE, M. B.; VANOTTI, M. B.; WILLIAMS, J. R.; THOMSON, A. M. Simulating Long-Term and Residual Effects of Nitrogen Fertilization on Corn Yields, Soil Carbon Sequestration, and Soil Nitrogen Dynamics. Journal of Environmental Quality, 2006, v.35, p.1608–1619.

HERRICK, J. E.; WANDER, M. M. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: the importance of distribution, composition, and soil biological activity. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1997.

HUNGRIA, M.; CAMPOS, J. R.; MENDES, I. C. Fixação Biológica do Nitrogênio na Cultura da Soja. EMBRAPA Soja, 2001, Circular Técnica nº 35.

IAPAR - INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ, disponível em: <http://www.iapar.br/>. Acesso em: 10/12/2013.

INDA JUNIOR, A. V.; TORRENT, J.; BARRÓN, V.; BAYER, C.; FINK, J. R. Iron oxides dynamics in a subtropical Brazilian Paleudult under long-term no-tillage management. *Scientia Agricola*, 2013, v.70, n.1, p.48-54.

JAGADAMMA, S.; LAL, R.; HOEFT, R. G.; NAFZIGER, E. D.; ADEE, E. A. Nitrogen fertilization and cropping system impacts on soil properties and their relationship to crop yield in the central Corn Belt, USA. *Soil & Tillage Research*, 2008, v.98, p.120–129.

JONES, D. L.; HODGE, A.; KAZYAKOV, Y. Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *New Phytologist*, 2004, v.163, p.459–480.

KAISER, K.; GUGGENBERGER, G. Mineral surfaces and soil organic matter. *European Journal of Soil Science*, 2003, v.54, p.219–236.

KLEBER, M.; MIKUTTA, R.; TORN, M. S.; JAHN, R. Poorly crystalline mineral phases protect organic matter in acid subsoil horizons. *European Journal of Soil Science*, 2005, v.56, p.717–725.

KUMHÁLOVÁ, J.; KUMHÁLA, F.; KROULÍK, M.; MATĚJKOVÁ, S. The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. *Precision Agriculture*, 2011, v.12, p.813–830.

LAL, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 2004a, n.304, v.1623.

LAL, R.; GRIFFIN, M.; APT, J.; LAVE, L.; MORGAN, M. G.; Managing Soil Carbon. *Science*, 2004b, v.304.

LAL, R. Carbon Sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Biological sciences*, 2008, v.363.

LEVINE, E. R.; KNOX, R. G.; LAWRENCE, W. T. Relationships between Soil Properties and Vegetation at the Northern Experimental Forest, Howland, Maine. *Remote Sensing Environment*, 1994, v.47, p.231-241.

LI, Q.; YUE, T.; WANG, C.; ZHANG, W.; YU, Y.; LI, B.; YANG, J.; BAI, G. Spatially distributed modeling of soil organic matter across China: An application of artificial neural network approach. *Catena*, 2013a, v.104, p.210–218.

LI, P.; ZHANG, T.; WANG, X.; YU, D. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. *Soil & Tillage Research*, 2013b, v.126, p.112–118.

LIENHARD, P.; TIVET, F.; CHABANNE, A.; DEQUIEDT, S.; LELIÈVRE, M.; SAYPHOUMMIE, S.; LEUDPHANANE, B.; PRÉVOST-BOURÉ, N. C.; SÉGUY, L.; MARON, P.; RANJARD, L. No-till and cover crops shift soil microbial abundance and diversity in Laos tropical grasslands. *Agronomical Sustainable Development*, 2012.

LIENHARD, P.; TERRAT, S.; MATHIEU, O.; LAVÊQUE, J.; PRÉVOST-BOURÉ, N. C.; NOWAK, V.; RÉGNIER, T.; FAIVRE, C.; SAYPHOUMMIE, S.; PANYASIRI, K.; TIVET, F.; RANJARD, L.; MARON, P. Soil microbial diversity and C turnover modified by tillage and cropping in Laos tropical grassland. *Environmental Chemistry Letters*, 2013.

LILBURNE, L.R., A.E. HEWITT, and T.W. WEBB. Soil and informatics Science combine to develop S-map: A new generation soil information system for New Zealand. *Geoderma*, 2012, v.170, p.232–238.

MACCARTHY, D. S.; SOMMER, R.; VLEK, P. L. G. Modeling the impacts of contrasting nutrient and residue management practices on grain yield of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in a semi-arid region of Ghana using APSIM. *Field Crops Research*, 2009, v.113, p.105–115.

MAHANTA, D.; BHATTACHARYYA, R.; GOPINATH, K. A.; TUTI, M. D.; JEEVANANDAN, K.; CHANDRASHEKARA, C.; ARUNKUMAR, R.; MINA, B. L.; PANDEY, B. M.; MISHRA, P. K.; BISHT, J. K.; SRIVASTVA, A. K.; BHATT, J. C. Influence of farmyard manure application and mineral fertilization on yield sustainability, carbon sequestration potential and soil property of garden pea–french bean cropping system in the Indian Himalayas. *Scientia Horticulturae*, 2013, v.164, p.414–427.

MAZZARINO, M. J.; SZOTT, L.; JIMENEZ, M. Dynamics of soil total C and N, microbial biomass, and water-soluble C in tropical agroecosystems. *Soil Biology Biochemistry*, 1993, v.25, n.2, p.205–214.

MEERSMANS, J.; RIDDER, F. D.; CANTERS, F.; BAETS, D. S.; VAN MOLLE, M. A multiple regression approach to assess the spatial distribution of Soil Organic Carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium). *Geoderma*, 2008, v.143, p.1–13.

MILNE E; PAUSTIAN K; EASTER M; SESSAY M; AL-ADAMAT R; BATJES N. H; BERNOUX M; BHATTACHARYYA T; CERRI C. C; CERRI C. E. P; COLEMAN K; FALLOON P; FELLER C; GICHERU P; KAMONI P; KILLIAN K; PAL D. K. An increased understanding of soil organic carbon stocks and changes in non-temperate areas: National and global implications. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, v.122, p.125–136.

MINEROPA – Serviço Geológico do Paraná, disponível em: <http://www.mineropar.pr.gov.br/>. Acesso em: 13/12/2013.

MIRANDA, C.H.B. Ciclagem de nutrientes em pastagens com vistas à sustentabilidade do sistema. Campo Grande, 2002, p.16.

MISHRA, U.; LAL, R.; LIU, D.; MEIRVENNE, M. V. Predicting the Spatial Variation of the Soil Organic Carbon Pool at a Regional Scale. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, v.74, p. 906–914.

MISHRA, U.; TORN, M. S.; MASANET, E.; OGLE, S. M. Improving regional soil carbon inventories: Combining the IPCC carbon inventory method with regression kriging. *Geoderma*, 2012, v.189, n.190, p.288–295.

MULLER, T. G.; PIERCE, F. J. Soil Carbon Maps: Enhancing Spatial Estimates with Simple Terrain Attributes at Multiple Scales. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, v.67, p.258–267.

NOAA - NATIONAL OCEANIC and ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Disponível em: <http://www.noaa.gov/>. Acesso em: 15/12/2013.

OGLE, S. M.; SWAN, A.; PAUSTIAN, K. No-till management impacts on crop productivity, carbon input and soil carbon sequestration. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 2012, v.149, p.37– 49.

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

PALM, C.; SANCHEZ, P.; AHAMED, S.; AWITI, A. Soils: A Contemporary Perspective. *Annual Review of Environment and Resources*, 2007, v.32, p.99-129.

PAN, G.; XU, X.; SMITH, P.; PAN, W.; LAL, R. An increase in topsoil SOC stock of China's croplands between 1985 and 2006 revealed by soil monitoring. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, v.136, p.133–138.

POIER, K. R.; RICHTER, J. Spatial distribution of earthworms and soil properties in arable loess soil. *Soil Biological Biochemistry*, 1992, v.24, n.12, p.1601-1608.

POIRIER, V.; ANGERS, D. A.; ROCHETTE, P.; CHANTIGNY, M. H.; ZIADI, N.; TREMBLAY, G.; FORTIN, J. Interactive Effects of Tillage and Mineral Fertilization on Soil Carbon Profiles. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, v.73, n.1.

PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy*, New York, 1972, v.24, p.29-96.

QIU, J.; WANG, L.; LI, H.; TANG, H.; LI, C.; VAN RANST, E. Modeling the Impacts of Soil Organic Carbon Content of Croplands on Crop Yields in China. *Agricultural Sciences in China*, 2009, v.8, n.4, p.464-471.

R Development Core Team R: A language and environment for statistical computing. ISBN 3- 900051-07-0, 2012.

RASMUNSEN, P. E.; DOUGLAS, C. L.; COLLINS, H. P.; ALBRECHT, S. L. Long-Term cropping system effects on mineralizable nitrogen in soil. *Soil Biology Biochemistry*, 1998, v.30, n.13, p.1829-1837.

RUMPEL, C.; BA, A.; DARBOUX, F.; CHAPLOT, V.; PLANCHON, O. Erosion budget and process selectivity of black carbon at meter scale. *Geoderma*. 2009, v.154, p.131–137.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; DICK, W. A.; LAL, R.; VENSKE FILHO, S. P.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E. Organic Matter Dynamics and Carbon Sequestration Rates for a Tillage Chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, v.65.

SÁ, J. C. M.; SÁ, M. F. M.; SANTOS, J. B.; OLIVEIRA, A. Dinâmica da Matéria Orgânica nos Campos Gerais. Em: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo ecossistemas tropicais e subtropicais, 2º Ed. Porto Alegre, 2008.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; LAL, R.; DICK, W. A.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E. Soil organic carbon and fertility interactions affected by a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil & Tillage Research*, 2009, v.104, p.56–64.

SÁ, J. C. M.; Lal, R. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. *Soil & Tillage Research*, 2009, v.103, p.46-56.

SÁ, J. C. M.; SANTOS, J. B.; LAL, R.; MORAES, A.; TIVET, F.; SÁ, M. F. M.; BRIEDIS, C.; FERREIRA, A. O.; EURICH, G.; FARIAS, A.; FRIEDRICH, T. Soil-Specific Inventories of Landscape Carbon and Nitrogen Stocks under No-till and Native Vegetation to Estimate Carbon Offset in a Subtropical Ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 2013a, v.77, p.2094-20110.

SÁ, J. C. M.; SÉGUY, L.; TIVET, F.; LAL, R.; BOUZINAC, S.; BORSZOWSKI, P. R.; BRIEDIS, C.; SANTOS, J. B.; HARTMAN, D. C.; BERTOLONI, C. G.; ROSA, J.; FRIEDRICH, T. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. *Land Degradation and Development* (Print), 2013b.

SÁ, J. C. M.; TIVET, F.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; HARTMAN, D. C.; SANTOS, J. Z.; SANTOS, J. B. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. *Soil & Tillage Research*, 2014, v.136, p.38–50.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; MARTIN, T. N.; PIRES, J. L.; FLORA, L. P. D.; BASSO, J. C. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, 2012, v.9, n.47, p.1346-1357.

SANTOS, N. Z.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MOLIN, R.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V.; PIVA, J. T. Forages, cover crops and related shoot and root additions in no-till rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. *Soil & Tillage Research*, 2011, v.111, p.208–218.

SCHULP, C. J. E.; VERBURG, P. H. Effect of land use history and site factors on spatial variation of soil organic carbon across a physiographic region. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, v.133, p.86–97.

SCHNITZER, M. Humic Substances: Chemistry and Reactions. Em: SCHNITZER, M.; KHAN, S. U. *Soil Organic Matter*. Elsevier, Amsterdam, 1978.

SILVA, A. B., História dos Sistemas de Informação Geo-Referenciados (SIGs). Em: *Sistemas de Informação Geo-Referenciados: Conceitos e Fundamentos*. Campinas, SP: Editora UNICAMP, 2003, p. 36-66.

SILVA, P. C. G.; FOLONI, J. S. S.; FABRIS, L. B.; TIRITAN, C. S. Fitomassa e relação C/N em consórcios de sorgo e milho com espécies de cobertura. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, 2009, v.44, n.11, p.1504-1512.

SILVA, F. D.; AMADO, T. J. C.; FERREIRA, A. O.; ASSMANN, J. M.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F. Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop–livestock production with different pasture grazing intensities in Southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, v.190, p.60–69.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology Biochemistry*, 2000, v.32, p.2099–2103.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, v.241, p.155–176.

SIX, J.; FREY, D. S.; THIET, R. K.; BATTEN, K. M. Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, v.70.

SPARKS, D. L. *Environmental Soil Chemistry*, 2° Ed. Elsevier Science (USA), 2003.

SPOSITO, G. *The Surface Chemistry of Soils*. Oxford University press, New York, 1984.

STEVENSON, F. J. *Cycles of Soil*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1986.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia Vegetal*, 3° Ed. Editora Artmed, Trad. Eliane Romanato Santarém, Porto Alegre, 2004.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*. 1982, v.33, p.141–163.

TIVET, F.; SÁ, J. C. M.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; BORSZOWSKI, P. R.; SANTOS, J. B.; FARIAS, A.; EURICH, G.; HARTMAN, D. C.; NADOLNY JUNIOR, M.; BOUZINAC, S.; SÉGUY, L. 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*, 2013, v.126, p.203–218.

TOBIAŠOVÁ, E. The effect of organic matter on the structure of soils of different land uses. *Soil & Tillage Research*, 2011, v.114, p.183–192.

TORNQUIST, C. G.; GASSMAN, P. W.; MIELNICZUK, J.; GIASSON, E.; CAMPBELL, T. Spatially explicit simulations of soil C dynamics in Southern Brazil: Integrating century and GIS with i_Century. *Geoderma*, 2009, v.150, p.404–414.

VICTORIA, E. L.; FERNANDES, H. C.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R.; LACERDA, E. G. Correlação linear e espacial entre produtividade de *Brachiaria brizantha*, densidade do solo e porosidade total em função do sistema de manejo do solo. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, 2012, v.32, n.5, p.909-919.

VIEIRA, F. C. B.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; HE, J. L. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. *Soil & Tillage Research*, 2007, v.96, p.195–204.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science*, 1934, v.63, p.251-263.

WANG, Y.; FU, B.; LÜ, Y.; SONG, C.; LUAN, Y. Local-scale spatial variability of soil organic carbon and its stock in the hilly area of the Loess Plateau, China. *Quaternary Research*, 2010, v.73, p.70–76.

WANG, S.; WANG, X.; OUYANG, Z. Effects of land use, climate, topography and soil properties on regional soil organic carbon and total nitrogen in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, v.24, n.3, p.387–395.

WANSHNONG, R. K.; THAKURIA, D.; SANGMA, C. B.; RAM, V.; BORA, P. K. Influence of hill slope on biological pools of carbon, nitrogen, and phosphorus in acidic alfisols of citrus orchard. *Catena*, 2013, v.111, p.1–8.

WEIL, R.R; ISLAM, K.R; STINE, M.A. et. al. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*, 2003, v.18, p.3–17.

ZHANG, W.; XU, M.; WANG, B.; WANG, X. Soil organic carbon, total nitrogen and grain yields under long-term fertilizations in the upland red soil of Southern China. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 2009, v.84, p.59–69.