

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**ESTOQUE DE CARBONO EM ÁREAS PIONEIRAS DE
PLANTIO DIRETO NO RIO GRANDE DO SUL**

TESE DE DOUTORADO

Ademir de Oliveira Ferreira

Santa Maria, RS, Brasil

2014

ESTOQUE DE CARBONO EM ÁREAS PIONEIRAS DE PLANTIO DIRETO NO RIO GRANDE DO SUL

Ademir de Oliveira Ferreira

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós- Graduação em
Ciência do Solo, Área de Concentração em Biodinâmica e Manejo do Solo,
da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ferreira, Ademir de Oliveira
Estoque de carbono em áreas pioneiras de plantio
direto no Rio Grande do Sul. / Ademir de Oliveira
Ferreira.-2014.
150 p.; 30cm

Orientador: Telmo Jorge Carneiro Amado
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2014

1. Solos subtropicais 2. Carbono profundo 3. Plantio
direto consolidado 4. Conversão. Estoque de carbono 5.
Latossolo I. Amado, Telmo Jorge Carneiro II. Título.

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a Ademir de Oliveira Ferreira. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: aoferreira1@yahoo.com.br

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**ESTOQUE DE CARBONO EM ÁREAS PIONEIRAS DE PLANTIO
DIRETO NO RIO GRANDE DO SUL**

elaborada por
Ademir de Oliveira Ferreira

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo

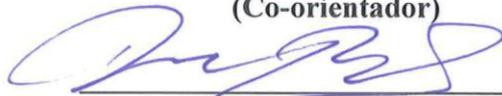
COMISSÃO EXAMINADORA:



**Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado
(Presidente/Orientador)**



**Charles W. Rice, Prof. PhD. (KSU)
(Co-orientador)**



Dorivar Ruiz Diaz, Prof. PhD. (KSU)



Mastrângelo Enivar Lanza Nova, Prof. Dr. (UERGS)



Rodrigo da Silveira Nicoloso, Prof. Dr. (UFSM)

Santa Maria, 26 de fevereiro de 2014.

AGRADECIMENTOS

À Deus por iluminar meu caminho e me dar forças para seguir sempre em frente.

À minha querida esposa, Cibelle Engels, pela paciência, compreensão, incentivo, confiança, companheirismo, amor..., fundamentais para a superação de todas as etapas do doutorado.

Aos meus pais, Antônio e Vergília, e aos meus irmãos, Ademar, Joelma e Fátima, pela compreensão, carinho e apoio incondicional durante esta caminhada.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Departamento de Solos e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS), pela infraestrutura e oportunidade para a realização do curso de doutorado.

Ao professor Telmo Jorge Carneiro Amado, por toda orientação durante os últimos quatro anos, durante o período de doutoramento. Agradeço também pela sua confiança, amizade, incentivo, conselhos e encorajamento durante o período de doutorado.

I'm very grateful to professor Charles W. Rice, for his mentorship and help throughout the period I spent at KSU, but mostly for your attention, trust and friendship.

I would like to thank the Department of Agronomy, Kansas State University (KSU), for providing me an opportunity to conduct a period sandwich of my doctoral research there and making my stay comfortable.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de doutorado no país, fundamentais para a condução e conclusão do doutorado.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo da UFSM, pelos ensinamentos. Aos colegas de pós-graduação, em especial ao Vitor Girardello, Jardes, Tiago Hörbe, Douglas Dalla Nora, Cristiano Keller e Tiago Teixeira, Fernando Hansel, pelos estudos em grupo, discussões, coleguismo e, principalmente, pela amizade.

Aos pesquisadores e alunos de iniciação científica do laboratório de Uso, Manejo e Conservação do Solo, pela acolhida, atenção e ajuda na realização das análises.

Por fim, agradeço ao apoio de todos que de alguma forma ajudaram e fizeram parte desta importante etapa.

A todos, meu muito obrigado!

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria, RS.

ESTOQUE DE CARBONO EM ÁREAS PIONEIRAS DE PLANTIO DIRETO NO RIO GRANDE DO SUL

AUTOR: ADEMIR DE OLIVEIRA FERREIRA
ORIENTADOR: TELMO JORGE CARNEIRO AMADO
Santa Maria, 26 de fevereiro de 2014.

A mudança no uso da terra é um fator importante que afeta o estoque de C do solo e a sua distribuição no perfil. A conversão da CN para sistemas agrícolas provoca uma queda acentuada no estoque de C no solo, especialmente quando o manejo do solo é baseado em operações de manejo intensivo e frequentes e entrada de resíduo da colheita limitado. No entanto, a adoção do sistema de conservação com base na perturbação mínima do solo e sistema de cultivo intensivo pode restaurar em algum nível do estoque de C no solo. Assim, o presente estudo buscou selecionar seis áreas pioneiras e de referência no SPD no Rio Grande do Sul, que hoje estão na fase de sistema consolidado (> 20 anos) pareadas com campo nativo vizinho. Este estudo está dividido em três capítulos: a) no primeiro foi avaliado o acúmulo e redistribuição de carbono no perfil; b) no segundo capítulo foi avaliado os fatores determinantes no acúmulo de carbono em camada superficial (0-15 cm) e profunda (0-60 cm) desses solos; c) e o terceiro capítulo testou a hipótese de que a RE é afetada por ordem do solo e tipo de clima. Os tratamentos principais foram preparo do solo e diferentes sistemas de cultivo em dois experimentos de longa duração. A implantação das seis áreas sob SPD variou de 1978 a 1990, com diferentes gradientes texturais e mineralógicos. As amostras de solo foram coletadas em cinco profundidades de solo em um perfil de solo (0-100 cm). O conteúdo de C no solo foi determinado por combustão seca usando um analisador de C/N. O estoque de C no solo foi calculado com base na massa de solo equivalente. Foi realizada a análise de componentes principais (ACP) no software Statistica versão 7 e utilizada uma matriz de dados composta por 24 variáveis (atributos de clima, relevo e solo da camada superficial e subsuperficial). Foi realizada ainda uma regressão múltipla para modelar o estoque de C na camada de 0-15 e 60-100 cm de profundidade, pelo método "Stepwise", técnica de seleção de variáveis Forward. As análises estatísticas da regressão foram feitas através do programa JMP IN versão 3.2.1 (SALL et al., 2005), utilizando-se o teste F, a 5% de significância. No capítulo 1 os dados apresentados indicam que o local 1 (Santa Rosa) foi o que mais reduziu o estoque de C pela conversão do CN para sistema de cultivos, variando de 32 a 39%. O estoque de C superficial (0-5 cm) foi recuperado integralmente nos locais Local 2 (Manoel Viana), Local 3 (Palmeira das Missões), Local 4 (Lagoa Vermelha) e Local 5 (Cruz Alta), sendo essa recuperação de 144% para o Neossolo Quartzarênico e variando de 100 a 122 % para os Latossolos argilosos. As maiores alterações, no que diz respeito à redistribuição e incremento de estoque de C, ocorreram no Latossolo dos locais 4 (Lagoa Vermelha) e 5 (Cruz Alta). Houve incremento nas concentrações de COP nos locais de Lagoa Vermelha e Cruz Alta em todo perfil amostrado em relação ao CN. No capítulo 2 os fatores que determinaram o acúmulo de C foram diferentes na condição da camada subsuperficial (60-100 cm) em relação à camada superficial (0-15 cm). Na camada superficial (0-15 cm), a saturação de cálcio, magnésio, CTC efetiva e MOS foram fatores correlacionados positivamente com o estoque de C tanto em SPD como em CN. Na camada subsuperficial (60-100 cm) os atributos que melhor se correlacionaram positivamente com o estoque de C no SPD foram altitude e MOS no SPD, e a argila, MOS e óxidos de ferro no CN. A maior altitude (801 m) e a menor temperatura média anual (16,7 °C) favoreceram o acúmulo de estoques de C superficial (0-15 cm) e subsuperficial (60-100 cm) no SPD. Sendo, que a mudança de temperatura média anual no horizonte subsuperficial teve correlação mais sensível com o estoque de C ($R^2 = -0,91$) em relação ao horizonte superficial ($R^2 = -0,81$). No capítulo 3, os índices de RE e CPI mais elevados foram encontrados sob tratamentos com perturbação mínima do solo e rotação de culturas intensivas. Valores de RE e CPI baixos estavam associados a mobilização frequente e menor diversidade de culturas. Estes índices de RSE sensibilidade distinguiu a intensidade de plantio direto (PD substituindo PC) e sistemas de cultivo (culturas de cobertura de inverno substituindo sucessão pousio ou cultura). Portanto, diante desses resultados, a associação do SPD com a intensificação de sistemas de cultivo de longo prazo é uma ferramenta eficiente para a recuperação do C no solo, desempenhando um papel crucial na produtividade do ecossistema, ambiental e de qualidade do solo.

Palavras-chave: Solos subtropicais. Carbono profundo. Plantio direto consolidado. Conversão. Estoque de carbono. Latossolo.

ABSTRACT

Doctoral Thesis in Soil Science
Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria, Brazil

CARBON STOCK IN PIONEERING AREAS OF NO-TILLAGE IN RIO GRANDE DO SUL

AUTHOR: ADEMIR DE OLIVEIRA FERREIRA
ADVISOR: TELMO JORGE CARNEIRO AMADO
Santa Maria, February 26th, 2014.

The change in land use is an important factor affecting soil C stocks and their distribution in the soil profile. The conversion of native vegetation (NV) for agricultural systems causes a sharp decline in carbon storage in the soil, especially when the soil management is based on intensive and frequent handling and input waste of limited harvest operations. However, the adoption of the preservation system based on minimal soil disturbance and intensive cultivation system can restore levels of soil C stock. Thus, this study aimed to select six pioneer and reference areas of no-till in Rio Grande do Sul, which are now at the stage of consolidated system (>20 years) and paired with nearby native vegetation. This study is divided into three chapters: a) the first evaluated the accumulation and redistribution of carbon in the profile; b) second chapter evaluated key elements in the accumulation of carbon in the surface (0-15 cm) and deep (60-100 cm) layers c) and the third chapter tested the hypothesis that the CSR is affected by soil order and climate type. The main treatments were soil tillage and different cropping systems in two long-term experiments. The implementation of no-till for the six areas ranged from 1978 to 1990, with different textural and mineralogical gradients. Soil samples were collected at five soil depths in a soil profile (0-100 cm). The C content in the soil was determined by dry combustion analyzer using a C/N. The soil C stock was calculated based on the equivalent mass of soil. The principal component analysis (PCA) were performed with the Statistica software version 7 and used a data matrix consisting of 24 variables (attributes of climate, topography and soil surface and subsurface layer). Multiple regressions were also performed to model the C stock in the layer 0-15 and 60-100 cm depth, the method of "Stepwise" selection technique of Forward variables. The statistical regression analyzes were performed using the program JMP iN version 3.2.1 (SALL et al. 2005), using the F test at 5% significance. In chapter 1 data presented indicate that site 1 (Santa Rosa) showed the most reduction in C stock for the conversion of NV to cropping system, ranging 32-39%. C stock surface (0-5 cm) was fully recovered at site 2 (Manoel Viana), site 3 (Palm Missions), site 4 (Lagoa Vermelha) and site 5 (Cruz Alta), with this recovery of 144 % for Typic Quartzipsamment and ranging from 100 to 122% for Oxisols. The biggest changes, with regard to redistribution and increase of carbon storage occurred in the Oxisol, site 4 (Lagoa Vermelha) and 5 (Cruz Alta). There was an increase in the concentrations of particulate organic carbon (POC) in the Lagoa Vermelha and Cruz Alta, sites 4 and 5, across sampled profile relative to NV. In chapter 2 the factors that determined the accumulation of C were different in the condition of subsuperficial layer (60-100 cm) in relation to the surface layer (0-15 cm). In the surface layer (0-15 cm), the saturation of calcium, magnesium, effective cation exchange capacity (CEC) and SOM were positively correlated with the C stock in both no-till and NV. In the subsurface layer (60-100 cm) the attributes that best correlated positively with the C stock in the no-till were altitude and soil organic matter (SOM) in the no-till, and clay, and iron oxides SOM in NV. The highest altitude (801 m) and lower mean annual temperature (16.7°C) favored the accumulation of C stock of surface (0-15 cm) and subsoil (60-100 cm) in no-till. Being that the change in mean annual temperature in the subsurface horizon was more sensitive correlation with the C stock ($R^2 = -0.91$) compared to the surface horizon ($R^2 = -0.81$). In Chapter 3, the higher CSR and CPI indices were found under treatments with minimum soil disturbance and intensive crop rotation. Lower CSR and CPI values were associated with frequent mobilization and lower crop diversity. These CSR indices sensitively distinguished the intensity of tillage (NT replacing CT) and cropping systems (cover crops replacing winter fallow or crop succession). Therefore, given these results, the combination of the no-till with the intensification of cultivation of long-term systems is an efficient tool for the recovery of soil C, playing a crucial role in productivity, environmental ecosystem and soil quality.

Keywords: Subtropical soils. Deep carbon. Consolidated no-till. Conversion. Carbon stock. Oxisol.

LISTA DE TABELAS

CAPITULO I

TABELA 1 –	Descrição das áreas: Localização, tipo de solo, conteúdo de argila, material de origem, clima, uso do solo (sistemas de cultivo), duração do SPD e profundidade de amostragem.....	30
TABELA 2 –	Variação da densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) em diferentes profundidades das áreas amostradas e das áreas vizinhas com campo nativo.....	42
TABELA 3 –	Concentrações de carbono orgânico do solo ($g\ kg^{-1}$) em diferentes profundidades das áreas amostradas e das áreas vizinhas com campo nativo.....	45
TABELA 4 –	Balanço de C (PC x SPD x CN) em experimentos de longa duração no sul do Brasil.....	68

CAPITULO II

TABELA 1 –	Autovalores e variância acumulada obtidos na ACP a partir dos dados originais de Campo Nativo.....	89
TABELA 2 –	Correlação entre variáveis para estoque de carbono no solo na camada de 0-15 cm em SPD no Rio Grande do Sul.....	91
TABELA 3 –	Autovalores e variância acumulada obtidos na ACP a partir dos dados originais de Campo Nativo.....	94
TABELA 4 –	Correlação entre variáveis para estoque de carbono no solo na camada de 0-15 cm em campo nativo no Rio Grande do Sul.....	96
TABELA 5 –	Autovalores e variância acumulada obtidos na ACP a partir dos dados originais de SPD.....	99
TABELA 6 –	Correlação entre variáveis para estoque de carbono no solo na camada de 60-100 cm em SPD no Rio Grande do Sul.....	101
TABELA 7 –	Autovalores e variância acumulada obtidos na ACP a partir dos dados originais de campo nativo.....	103
TABELA 8 –	Correlação entre variáveis para estoque de carbono no solo na camada de 60-100 cm em campo nativo no Rio Grande do Sul.....	105

CAPITULO III

TABLE 1 –	Main soil characteristics by the establishment of the experiments.....	114
TABLE 2 –	Description of cultivars adopted.....	115
TABLE 3 –	Analysis of variance (ANOVA) of the two investigated experiments.	118
TABLE 4 –	Mean annual aboveground crop residues C, N inputs.	122
TABLE 5 –	SOC concentration and CSR in the Oxisol as affected by sol tillage and cropping systems.....	123
TABLE 6 –	SOC concentration and CSR in the Alfisol as affected by cropping systems under no-till.....	124
TABLE 7 –	Carbon stratification ratio (CSR) as affected by long-term tillage and cropping systems in temperate and subtropical agroecosystems.....	132

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

FIGURA 1 –	Local 1. Cronologia do uso do solo na área de Santa Rosa - RS.....	31
FIGURA 2 –	Local 2. Cronologia do uso do solo na área de Manoel Viana - RS....	32
FIGURA 3 –	Local 3. Cronologia do uso do solo na área de Palmeira das Missões (20 anos). 1960 = conversão da vegetação natural em áreas de lavoura; 1970-1978 = culturas (soja no verão e trigo no Inverno) foram cultivadas em preparo convencional; 1991-2011 = milho/nabo-forrageiro/trigo/soja/aveia-preta e/ou branca sob plantio direto de longa duração.....	33
FIGURA 4 –	Local 3. Cronologia do uso do solo na área de Palmeira das Missões (33 anos). 1960 = conversão da vegetação natural em áreas de lavoura; 1970-1978 = culturas (soja no verão e trigo no Inverno) foram cultivadas em preparo convencional; 1978-2011 = milho/nabo-forrageiro/trigo/soja/aveia-preta e/ou branca sob plantio direto de longa duração.....	34
FIGURA 5 –	Local 4. Cronologia do uso do solo na área de Lagoa Vermelha-RS..	35
FIGURA 6 –	Local 5. Cronologia do uso do solo na área de Cruz Alta-RS.....	35
FIGURA 7 –	Local 6. Cronologia do uso do solo na área de Fortaleza dos Valos - RS.....	35
FIGURA 8 –	Mapa dos pontos das áreas amostradas sobrepostos sobre o mapa de vegetação do Rio Grande do Sul.....	37
FIGURA 9 –	Detalhe do procedimento de amostragem das áreas.....	38
FIGURA 10 –	Estoque de C (Mg ha^{-1}) em Latossolo Vermelho argiloso sob SPD de longa duração (Santa Rosa – RS) e em campo nativo vizinho. a) Estoque de C estratificado e b) Estoque de C acumulado. CN = Campo Nativo; SPD = Sistema plantio direto.....	48

- FIGURA 11 – Mudança de estoque de C (Mg ha^{-1}) e Balanço de C (%) após 20 anos de SPD (soja/trigo/soja) em Latossolo Vermelho argiloso (Santa Rosa – RS). a) camada estratificada e b) camada acumulada. As barras de erro indicam a variação das amostras. Os valores são médias de cinco repetições. Balanço de C = quantidade de estoque de C (%) faltante para igualar o estoque de C do CN..... 49
- FIGURA 12 – Estoque de C (Mg ha^{-1}) em Neossolo Quartzarênico sob SPD de longa duração (Manoel Viana – RS) e em campo nativo vizinho. a) Estoque de C estratificado e b) Estoque de C acumulado. CN = Campo Nativo; SPD = Sistema plantio direto..... 51
- FIGURA 13 – Mudança de estoque de C (Mg ha^{-1}) e Balanço de C (%) após 20 anos de SPD (trigo/soja/aveia + nabo forrageiro/soja) em em Neossolo Quartzarênico (Manoel Viana – RS). a) camada estratificada e b) camada acumulada. As barras de erro indicam a variação das amostras. Os valores são médias de cinco repetições. Balanço de C = quantidade de estoque de C (%) faltante para igualar o estoque de C do CN..... 52
- FIGURA 14 – Estoque de C (Mg ha^{-1}) em Latossolo Vermelho sob SPD de longa duração (Lagoa Vermelha – RS) e em campo nativo vizinho. a) Estoque de C estratificado e b) Estoque de C acumulado. CN = Campo Nativo; † SPD = Sistema plantio direto de 33 anos; SPD†† = Sistema plantio direto 20 anos..... 55
- FIGURA 15 – Mudança de estoque de C (Mg ha^{-1}) e Balanço de C (%) após 20 e 33 anos de SPD (milho/nabo-forrageiro/trigo/soja/aveia preta) em Latossolo Vermelho argiloso (Palmeira das Missões – RS). (a) e (c) camada estratificada. (b) e (d) camada acumulada. As barras de erro indicam a variação das amostras. Os valores são médias de cinco repetições. Balanço de C = quantidade de estoque de C (%) faltante para igualar o estoque de C do CN. †SPD = Sistema plantio direto de 33 anos; SPD†† = Sistema plantio direto 20 anos..... 56
- FIGURA 16 – Estoque de C (Mg ha^{-1}) em Latossolo Vermelho argiloso sob SPD de longa duração (Lagoa Vermelha – RS) e em campo nativo vizinho. a) Estoque de C estratificado e b) Estoque de C acumulado. CN = Campo Nativo; SPD = Sistema plantio direto..... 59
- FIGURA 17 – Mudança de estoque de C (Mg ha^{-1}) e Balanço de C (%) após 20 anos de SPD (soja/nabo-forrageiro+aveia/milho/trigo) em Latossolo Vermelho argiloso (Lagoa Vermelha – RS). a) camada estratificada e b) camada acumulada. As barras de erro indicam a variação das amostras. Os valores são médias de cinco repetições. Balanço de C = quantidade de estoque de C (%) faltante para igualar o estoque de C do CN..... 60

FIGURA 18 –	Estoque de C (Mg ha ⁻¹) em Latossolo Vermelho argiloso sob SPD de longa duração (Cruz Alta – RS) e em campo nativo vizinho. a) Estoque de C estratificado e b) Estoque de C acumulado. CN = Campo Nativo; SPD = Sistema plantio direto.....	62
FIGURA 19 –	Mudança de estoque de C (Mg ha ⁻¹) e Balanço de C (%) após 25 anos de SPD (Aveia + ervilhaca/soja/milho/ nabo forrageiro/trigo) em Latossolo Vermelho argiloso (Cruz Alta – RS). a) camada estratificada e b) camada acumulada. As barras de erro indicam a variação das amostras. Os valores são médias de cinco repetições. Balanço de C = quantidade de estoque de C (%) faltante para igualar o estoque de C do CN.....	63
FIGURA 20 –	Estoque de C (Mg ha ⁻¹) em Latossolo Vermelho argiloso sob SPD de longa duração (Fortaleza dos Valos – RS) e em campo nativo vizinho. a) Estoque de C estratificado e b) Estoque de C acumulado. CN = Campo Nativo; SPD = Sistema plantio direto.....	65
FIGURA 21 –	Mudança de estoque de C (Mg ha ⁻¹) e Balanço de C (%) após 25 anos de SPD (trigo/soja/aveia-preta + nabo forrageiro/milho/nabo forrageiro) em Latossolo Vermelho argiloso (Fortaleza dos Valos – RS). a) camada estratificada e b) camada acumulada. As barras de erro indicam a variação das amostras. Os valores são médias de cinco repetições. Balanço de C = quantidade de estoque de C (%) faltante para igualar o estoque de C do CN.....	66
FIGURA 22 –	Cenário de perda e ganho de estoque de C em função do sistema de manejo ao longo dos anos.....	71
FIGURA 23 –	Distribuição do carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COAM). Local 4 (Lagoa Vermelha - RS). (a), (b) e (d) camada estratificada. (d) camada acumulada. SPD = sistema plantio direto; CN = campo nativo.....	72
FIGURA 24 –	Distribuição do carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COAM). Local 5 (Cruz Alta - RS). (a), (b) e (d) camada estratificada. (d) camada acumulada. SPD = sistema plantio direto; CN = campo nativo.....	73

CAPÍTULO II

FIGURA 1 –	Regressão entre atributos de determinantes no acúmulo de C da camada superficial (0-15 cm) em SPD de longa duração no Rio Grande do Sul. (○) Lagoa Vermelha; (□) Palmeira das Missões; (Δ) Cruz Alta; (◇) Fortaleza dos Valos; (*) Santa Rosa e (+) Manoel Viana.....	95
------------	---	----

FIGURA 2 –	Regressão entre atributos de determinantes no acúmulo de C da camada superficial (0-15 cm) em campo nativo. (○) Lagoa Vermelha; (□) Palmeira das Missões; (Δ) Cruz Alta; (◇) Fortaleza dos Valos; (*) Santa Rosa e (+) Manoel Viana.....	97
FIGURA 3 –	Regressão entre atributos de determinantes no acúmulo de C da camada subsuperficial (60-100 cm) em SPD de longa duração no Rio Grande do Sul. (○) Lagoa Vermelha; (□) Palmeira das Missões; (Δ) Cruz Alta; (◇) Fortaleza dos Valos; (*) Santa Rosa e (+) Manoel Viana.....	104
FIGURA 4 –	Regressão entre atributos de determinantes no acúmulo de C da camada subsuperficial (60-100 cm) em campo nativo. (○) Lagoa Vermelha; (□) Palmeira das Missões; (Δ) Cruz Alta; (◇) Fortaleza dos Valos; (*) Santa Rosa e (+) Manoel Viana.....	106

CAPÍTULO III

FIGURE 1 –	Description of crop rotation adopted in. (a) Oxisol. (b) Alfisol in Southern Brazil. R0= continuous crop succession soybean/wheat; R1= wheat/soybean/oat/soybean; R2= wheat/soybean/oat/soybean/oat+vetch/maize/radish. M/JB= maize + jack bean/soybean; M/F= maize/fallow/soybean; M/R= maize/ryegrass+ vetch/soybean; M/VB= maize+velvet bean/soybean; M/FR= maize/forage radish/soybean.....	116
FIGURE 2 –	Soil quality in response to improvements on soil management and crop rotation systems. (a) Oxisol; (b) Alfisol. CT= conventional tillage; NT= no-tillage. R0= continuous crop succession soybean/wheat; R1= wheat/soybean/oat/soybean; R2= wheat/soybean/oat/soybean/oat+vetch/maize/radish. M/JB= maize + jack bean/soybean; M/F= maize/fallow/soybean; M/R= maize/ryegrass+ vetch/soybean; M/VB= maize+velvet bean/soybean; M/FR= maize/forage radish/soybean. Carbon Pool Index= SOC in the treatment/ SOC in the control (native vegetation). SOC= soil organic carbon. Tukey test, to the level 5% of sigificance.	126
FIGURE 3 –	Relations of SOC (0-0.15 m), CSR (0-0.05: 0.05-0.15 m), and CPI indices (0-0.15 m). (a, c) Oxisol. (b, d) Alfisol. CSR= carbon stratification ratio; CPI= carbon pool index; SOC= soil organic carbon; CT= conventional tillage; NT= no-tillage. R0= continuous crop succession soybean/wheat; R1= wheat/soybean/oat/soybean; R2= wheat/soybean/oat/soybean/oat+vetch/maize/radish. M/JB= maize + jack bean/soybean; M/F= maize/fallow/soybean; M/R= maize/ryegrass + vetch/soybean; M/VB= maize + elvet bean/soybean; M/FR= maize/forage radish/soybean. CPI= SOC in	

the treatment/ SOC in the control (native vegetation). CSR= SOC in the shallow topsoil (0- 0.05 m)/ SOC in adjacent soil layer (0.05-0.15 m). 128

FIGURE 4 – CSR-based quantitative system proposed for classification of soil quality levels. **(a)** Oxisol; **(b)** Alfisol. CPI= carbon pool index; CSR = carbon stratification ratio; CT= conventional tillage; NT= no-tillage. R0= continuous crop succession soybean/wheat; R1= wheat/soybean/oat/soybean; R2= wheat/soybean/oat/soybean/oat+vetch/maize/radish. M/JB= maize + jack bean/soybean; M/F= maize/fallow/soybean; M/R= maize/ryegrass+ vetch/soybean; M/VB= maize+velvet bean/soybean; M/FR= maize/forage radish/soybean. CPI= SOC in the treatment/ SOC in the control (native vegetation). CSR= SOC in the shallow topsoil (0- 0.05 m)/ SOC in adjacent soil layer (0.05-0.15 m). SOC= soil organic carbon..... 130

LISTA DE SIGLAS

ACP	– Análise de Componentes Principais.
Al	– Alumínio.
C	– Carbono.
Ca	– Cálcio.
CN	– Campo Nativo
COAM	– Carbono Orgânico Associado aos Minerais
COP	– Carbono Orgânico Particulado
COT	– Carbono Orgânico Total
CP	– Componentes Principais
CPI=	– Carbon pool index
CSR=	– Carbon stratification ratio
CT=	– Conventional tillage
CTC	– Capacidade de Troca de Cátions
K	– Potássio
M/F=	– Maize/fallow/soybean
M/FR=	– Maize/forage radish/soybean
M/R=	– Maize/ryegrass+ vetch/soybean
M/VB=	– Maize+velvet bean/soybean
Mg	– Magnésio
MOS	– Matéria Orgânica do Solo
MS	– Matéria Seca
N	– Nitrogênio
NT	– Plantio Direto
NT=	– no-tillage
NTAM	– Nitrogênio Total Associado aos Minerais
NTP	– Nitrogênio Total Particulado
NV	– Vegetação Nativa
P	– Fósforo
PC	– Preparo Convencional
pH	– Potencial Hidrogeniônico
R0=	– continuous crop succession soybean/wheat
R1=	– wheat/soybean/oat/soybean
R2=	– wheat/soybean/oat/soybean/oat+vetch/maize/radish. M/JB= maize + jack bean/soybean
SPD	– Sistema de Plantio Direto.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	23
1.1 Hipótese	24
1.2 Objetivo geral.....	24
1.2.1 Objetivos específicos.....	24
2 CAPÍTULO I - ACÚMULO E REDISTRIBUIÇÃO DE CARBONO DAS PRINCIPAIS ÁREAS AGRÍCOLAS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO DO RIO GRANDE DO SUL	25
2.1 Resumo	25
2.2 Abstract	26
2.3 Introdução	27
2.4 Materiais e métodos.....	28
2.4.1 Descrição das áreas.....	28
2.4.1.1 Áreas pioneiras na adoção do plantio direto e caracterização das áreas experimentais.....	28
2.4.1.2 Histórico de uso e manejo das áreas.....	31
2.4.1.3 Caracterização e descrição da vegetação nativa.....	36
2.4.2 Delineamento experimental.....	38
2.4.3 Amostragem de solo.....	38
2.4.4 Determinação do conteúdo de carbono (C) no solo e densidade do solo.....	39
2.4.5 Cálculo do estoque de C, balanço de C no solo e fracionamento da matéria orgânica do solo (COP e COAM).....	39
2.4.6 Análise estatística.....	40
2.5 Resultados e discussão.....	40
2.5.1 Densidade do solo.....	40
2.5.2 Concentrações de carbono no solo.....	43
2.5.3 Estoques de C no solo.....	46
2.5.4 Cenário geral de perda e ganho de estoque de C em função do sistema de manejo.....	70
2.5.5 Redistribuição e retenção de carbono orgânico particulado e carbono associado aos minerais no perfil do solo.....	71
2.6 Conclusões	75
2.7 Referências	75
3 CAPÍTULO II – FATORES DETERMINANTES NO ACÚMULO DE CARBONO EM CAMADA SUPERFICIAL E PROFUNDA DE SOLOS AGRICOLAS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO¹.....	83
3.1 Resumo	83
3.2 Abstract	84
3.3 Introdução	85
3.4 Material e métodos	86
3.4.1 Descrição das áreas.....	86
3.4.2 Caracterização química.....	86
3.4.3 Determinação do conteúdo de carbono (C) no solo.....	87
3.4.4 Análise estatística.....	87
3.5 Resultados e discussão.....	87

3.5.1 Análise de componentes principais dos atributos de clima e solo na camada superficial (0-15 cm).....	87
3.5.1.1 Sistema plantio direto.....	87
3.5.1.2 Campo Nativo	89
3.5.2 Atributos determinantes no acúmulo de C da camada superficial de SPD de longa duração e campo nativo.....	92
3.5.3 Análise de componentes principais dos atributos de clima e solo na camada subsuperficial (60-100 cm)	98
3.5.3.1 Sistema plantio direto.....	98
3.5.3.2 Campo Nativo	100
3.5.4 Atributos determinantes no acúmulo de C da camada subsuperficial de SPD de longa duração e campo nativo.....	102
3.6 Conclusões.....	106
3.7 Referências.....	107

4 CAPÍTULO III – SOIL CARBON STRATIFICATION AFFECTED BY LONG-TERM TILLAGE AND CROPPING SYSTEMS IN SOUTHERN BRAZIL²	111
4.1 Abstract.....	111
4.2 Introduction	112
4.3 Materials and methods	113
4.3.1 <i>Description of the experimental areas</i>	113
4.3.2 <i>Soil sampling for SOC concentration</i>	118
4.3.3 <i>Carbon stratification ratio</i>	119
4.3.4 <i>Carbon Pool Index</i>	119
4.3.5 <i>Statistical analysis</i>	120
4.3.6 <i>Relationships of SOC, CSR and CPI</i>	120
4.4 Results and discussion	120
4.4.1 <i>Anova</i>	120
4.4.2 <i>C and N input by cropping systems</i>	120
4.4.3 <i>Concentration of SOC in different soil layers</i>	122
4.4.4 <i>Improvement in the quality of soil management</i>	124
4.4.5 <i>Relations of SOC, CSR and CPI indices</i>	127
4.4.6 <i>CSR in different agroecosystems</i>	131
4.5 Conclusions	133
4.6 References	133
5 PERSPECTIVAS DE ESTUDOS FUTUROS.....	139
APÊNDICE.....	141

1 INTRODUÇÃO GERAL

O sistema plantio direto (SPD) foi introduzido no sul do Brasil, no início da década de 70. O principal objetivo era controlar a erosão causada pelo uso de fogo na transição da lavoura de trigo para a lavoura de soja (MUZILLI, 1985). O sistema utilizado pelos primeiros agricultores do Rio Grande do Sul baseava-se na retirada dos resíduos vegetais da superfície e na intensa mobilização do solo, que associado às condições de relevo e clima provocaram severa degradação, limitando inclusive, a eficiência da aplicação de adubos e de corretivos por causa das perdas por erosão (ANGHINONI, 2005).

A partir do final da década de 70 e início dos anos 80, foram criados os primeiros programas visando o manejo conservacionista do solo, com redução do preparo e manutenção de cobertura vegetal na superfície. Segundo Mielniczuk (2003), em 1979 no RS mais de 90% da área cultivada era sob manejo com intensa mobilização de solo, enquanto que, em 1999, esse número reduziu para apenas 30%. Atualmente, o Rio Grande do Sul apresenta 4,5 milhões de hectares sob SPD (DERPSCH & FRIEDRICH, 2009), abrangendo aproximadamente 90% do total da sua área cultivada com culturas de grãos de sequeiro.

O presente estudo buscou selecionar áreas pioneiras e de referência no SPD, que hoje estão na fase de sistema consolidado, ou seja, com maior acúmulo de palha associado ao acréscimo de C, elevada CTC (capacidade de troca de cátions), menor imobilização de N do que a mineralização, e maior ciclagem de nutrientes (SÁ et al., 2004). Essas melhorias dos sistemas conservacionistas de longa duração têm contribuído na recuperação do estoque de C original. Por exemplo, no município de Vacaria (RS), Lopes et al. (2013) recentemente em trabalho de simulação dos estoques de C, encontraram que sistemas conservacionistas associados à rotação de culturas com alto aporte de biomassa, mostraram-se armazenadores potenciais de estoques de C no solo que foram superiores aos estoques originais de campo nativo. Diante disso, e visando avaliar a mudança de estoque de C real das áreas pioneiras na adoção do SPD do Rio Grande do Sul, o presente estudo foi dividido em três capítulos: a) no primeiro foi avaliado o acúmulo e redistribuição de carbono no perfil; b) no segundo capítulo foi avaliado os fatores determinantes no acúmulo de carbono em camada superficial (0-15 cm) e profunda (0-60 cm) desses solos; c) e o terceiro capítulo testou a hipótese de que a relação de estratificação do carbono (RE) é afetada por ordem do solo e tipo de clima.

1.1 Hipótese

A manutenção do sistema plantio direto por longo período de áreas referência no Rio Grande do Sul, associado à rotação de culturas diversificada e intensificada, eleva o conteúdo de carbono do solo ao nível original ou superior ao da vegetação natural (campo nativo).

1.2 Objetivo geral

- Avaliar a mudança de estoque de C até a profundidade de 1,0 m de áreas pioneiras na adoção do SPD comparando-as com ecossistema não perturbado (campo natural).
- Avançar no entendimento de quais são os mecanismos que levam a acumulação de C na superfície e em camadas profundas.
- Relacionar o acúmulo de C no subsolo (0,60-1,0 m) com atributos químicos e físicos do solo.
- Testar a hipótese de que a RE é afetada pela ordem do solo e tipo de clima.

1.3 Objetivos específicos

- Determinar o conteúdo de COT (Carbono Orgânico Total) nas profundidades: 0-0,05; 0,05-0,15; 0,15-0,30; 0,30-0,45; 0,45-0,60 e 0,60-1,0 m.
- Comparar o estoque de C das áreas pioneiras com o ecossistema não perturbado (campo natural) visando quantificar a mudança de estoque de C;
- Avançar no entendimento dos mecanismos de redistribuição o C no perfil do solo.
- Avaliar através da RE a qualidade de diferentes sistemas de preparo e de culturas de cobertura.

2 CAPÍTULO I - ACÚMULO E REDISTRIBUIÇÃO DE CARBONO DAS PRINCIPAIS ÁREAS AGRÍCOLAS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO DO RIO GRANDE DO SUL

2.1 Resumo

Em solos sob ecossistemas não perturbados como vegetação nativa (CN), o estoque de carbono do solo (C) está em estado estável, onde a entrada de resíduos orgânicos está em equilíbrio com perdas C. A conversão do CN para sistemas agrícolas provoca uma queda acentuada no estoque de C no solo, especialmente quando o manejo do solo é baseado em operações de manejo intensivo e frequentes e entrada de resíduo da colheita limitado. No entanto, a adoção do sistema de conservação com base na perturbação mínima do solo e sistema de cultivo intensivo pode restaurar em algum nível do estoque de C no solo. Neste estudo, foi avaliado a mudança dos estoques de carbono (C) do solo de seis locais no Rio Grande do Sul, onde os estoques de C no solo foram determinados em sistemas de plantio direto consolidado e vegetação nativa vizinha. A implantação do SPD nas áreas estudadas variou de 1978 a 1990, em áreas com diferentes gradientes texturais e mineralógicos. As amostras de solo foram coletadas em cinco profundidades de solo em um perfil de solo (0-100 cm). O delineamento experimental utilizado foi um arranjo em fatorial 2 x 6 distribuídos em blocos casualizados, com 12 tratamentos. Os fatores considerados foram: (a) Sistemas de Manejo: Plantio Direto de longa duração (> 20 anos); Vegetação campo nativo; (b) Profundidades de amostragem: 0-5; 5-15; 15-30; 30-45; 45-60 e 60-100 cm. O conteúdo de C no solo foi determinado por combustão seca usando um analisador de C/N. O estoque de C no solo foi calculado com base na massa de solo equivalente. Os dados apresentados indicam que o Local 1 (Santa Rosa) foi o que mais reduziu o estoque de C pela conversão do CN para sistema de cultivos, variando de 32 a 39%. O estoque de C superficial (0-5 cm) foi recuperado integralmente nos locais Local 2 (Manoel Viana), Local 3 (Palmeira das Missões), Local 4 (Lagoa Vermelha) e Local 5 (Cruz Alta), sendo essa recuperação de 144% para o Neossolo Quartzarênico e variando de 100 a 122 % para os Latossolos argilosos. As maiores alterações, no que diz respeito à redistribuição e incremento de estoque de C, ocorreram no Latossolo dos locais 4 (Lagoa Vermelha) e 5 (Cruz Alta). Houve incremento nas concentrações de COP nos locais de Lagoa Vermelha e Cruz Alta em todo perfil amostrado em relação ao CN, que pode ser explicado pelas mais baixas temperaturas médias anuais, altitudes altas, elevada precipitação anual e pelo SPD de longa duração que favoreceu a continuidade e verticalidade dos bioporos formados pelo sistema radicular do nabo-forrageiro são determinantes para justificar o aumento da translocação do COP em profundidade. Portanto, associando o SPD com a intensificação de sistemas de cultivo de longo prazo era uma ferramenta eficiente para a restauração do solo C, desempenhando um papel crucial na produtividade do ecossistema, ambiental e qualidade do solo.

Palavras-chave: Conversão. Plantio direto. Latossolo.

2.2 Abstract

In soils under undisturbed ecosystems such as native vegetation (NV), the soil carbon (C) stock is in stable state, where the input of organic waste is in equilibrium with losses C. The conversion of NV for agricultural systems causes a decline in carbon storage in the soil, especially when the soil management is based on intensive and frequent handling and input waste of limited harvest operations. However, the adoption of the preservation system based on minimal soil disturbance and intensive cultivation system can restore original levels of C stock in the soil. In this study, we evaluated the change in soil C stocks of six sites in Rio Grande do Sul, where C stocks in the soil were determined in consolidated no-till and native vegetation neighboring systems. The implementation of the no-till in the areas studied ranged from 1978 to 1990, in areas with different textural and mineralogical gradients. Soil samples were collected at five soil depths (0-100 cm). The experimental design was a factorial 2 x 6 array distributed in a randomized block design with 12 treatments. The factors considered were: (a) Management Systems: Long-term no-till (>20 years); native vegetation; (b) Sampling depths : 0-5, 5-15, 15-30, 30-45; 45-60 and 60-100 cm. The C content in the soil was determined by dry combustion using a C/N analyzer. The soil C stock has been calculated based on the equivalent mass of soil. The data presented indicate that Local 1 (Santa Rosa) was the most reduced the C stock for the conversion of CN to cropping system, ranging from 32 to 39%. The C stock of surface (0-5 cm) was fully recovered in local Local 2 (Manoel Viana), Local 3 (Palmeira das Missiões), site 4 (Lagoa Vermelha) and site 5 (Cruz Alta), such recovery 144 % for Typic Quartzipsamment and ranging from 100 to 122% Oxisols. The biggest changes, with regard to redistribution and increase of carbon storage occurred in the local Latossolo 4 (Lagoa Vermelha) and 5 (Cruz Alta). There was an increase in the concentrations of particulate organic carbon (POC) in the Lagoa Vermelha e Cruz Alta local in across sampled profile relative to CN, which can be explained by the lower average annual temperatures, high elevation, high annual precipitation and the long duration of no-till that favored continuity and verticality of biopores formed by the roots of forage radish are crucial to justify the increased translocation of POC in depth. Therefore, associating to no-till with the intensification of cultivation of long-term systems was an efficient tool to restore soil C, playing a crucial role in ecosystem productivity, environmental and soil quality.

Keywords: Conversion. No-till. Oxisol.

2.3 Introdução

A mudança no uso da terra é um fator importante que afeta o estoque de C do solo e a sua distribuição no perfil. É amplamente reconhecido que cultivo a base de arado convencional perturba a estrutura do solo e agregados (TIVET et al., 2013), induz a mudanças ambientais drásticas no solo (temperatura, umidade e oxigênio), diminui a atividade biológica global (BABUJIA et al., 2010), agrava emissões de CO₂ e outros gases de efeito estufa (ELLIOTT, 1986; POLSOW et al., 1987), e esgota estoque de carbono (SÁ et al., 2001; SÁ et al., 2013).

Nas principais áreas de produção de grãos do Rio Grande do Sul (Santa Rosa, Palmeira das Missões, Cruz Alta, Manoel Viana, Lagoa Vermelha), a conversão para o plantio direto (SPD) foi impulsionada pelos impactos ambientais adversos, principalmente a degradação do solo pela erosão, altos custos da produção agrícola tradicional mecanizada à base de arado e diminuição na quantidade de matéria orgânica do solo (MIELNICZUK et al. 2003; BAYER et al., 2006). Assim, o SPD têm sido amplamente adotado para minimizar os riscos de degradação do solo, para sustentar a produtividade dos agroecossistemas (MIELNICZUK et al. 2003; SÁ et al. 2014), e manter ou recuperar a estrutura e qualidade do solo (VEZZANI & MIELNICZUK, 2011).

Atualmente, o Brasil apresenta 32 milhões de hectares sob SPD, ou seja, 75% do total da sua área de culturas de grãos (GASSEN, 2012). Já o Rio Grande do Sul apresenta 90% do total da sua área cultivada com culturas de grãos de sequeiro ou aproximadamente 4,5 milhões de hectares, sob SPD (DERPSCH & FRIEDRICH, 2009). Diversos estudos reconhecem o papel dos solos como um dissipador de potencial para o CO₂ atmosférico (LAL, 2004) e há um crescente interesse na adoção SPD para armazenar o CO₂ atmosférico em solos e também para restaurar o C esgotado pela conversão de campo nativo (CN), em agroecossistemas.

Em solos sob ecossistemas não perturbados como vegetação nativa (CN), o teor de carbono do solo (C) está em estado estável, onde a entrada de resíduos orgânicos está em equilíbrio com perdas de C. Sob condições nativas, o solo organiza-se ao longo do tempo em uma estrutura bem definida pela sua composição granulométrica, química e atuação dos agentes biológicos, subordinados às condições ambientais em que o solo está inserido (VEZZANI & MIELNICZUK, 2011).

O SPD de longa duração busca se aproximar dessa estabilidade do CN, pois, caracteriza-se pelo maior acúmulo de palha associado ao acréscimo de C, elevada CTC, imobilização de N menor do que a mineralização, e maior ciclagem de nutrientes (SÁ et al.,

2004). Esse sistema se destaca ainda pela preservação dos macroagregados pelo mínimo revolvimento do solo. Nicoloso (2009) e Tivet et al. (2013) em clima subtropical observaram a dominância dos macroagregados (> 2 mm e 8-19 mm, respectivamente) na distribuição das classes de agregados sob plantio direto de longa duração, que por sua vez foi positivamente associado com a concentração de estoque de carbono.

A maioria dos estudos nacionais de mudança de estoque de C é sediada em áreas experimentais, sendo escassas essas pesquisas em áreas agrícolas comerciais sob SPD de longa duração. Este fato pode inviabilizar tecnicamente a auditoria de projetos de agricultura de baixo carbono por não retratar a verdadeira realidade de produtores de grãos no acúmulo de carbono.

Outro fator importe como estratégia para avaliar precisamente a mudança de estoque de C no perfil do solo induzida por sistemas de manejo é a profundidade de amostragem. Alguns estudos têm contribuído para a compreensão do efeito da redistribuição do estoque de C no perfil do solo (ZHANG et al., 2006; MÜELLER & KÖGEL-KNABNER, 2009; BODDEY et al., 2010; HARRISON et al. 2011; PIVA et al. 2012; REIS, 2012). Osher et al., (2003) e Don et al., (2009) afirmam que teriam superestimado as perdas de C após a mudança no manejo do solo de longa duração, se não tivessem considerado os horizontes subsuperficiais. Esses estudos considerando camadas mais profundas são vitais para entender a relação entre a redistribuição do estoque de carbono e a dinâmica do C no solo em diferentes sistemas de manejo.

Para tanto, o objetivo do presente estudo visa avaliar o acúmulo, o balanço e a redistribuição de carbono das principais áreas agrícolas sob sistema plantio direto consolidado do rio Grande do Sul, tendo como comparativo-base a vegetação nativa.

2.4 Materiais e métodos

2.4.1 Descrição das áreas

2.4.1.1 Áreas pioneiras na adoção do plantio direto e caracterização das áreas experimentais

Áreas pioneiras na adoção do plantio direto nas seis principais regiões produtoras de grãos do estado do Rio Grande do Sul: a) Cruz Alta, Santa Rosa, Lagoa Vermelha, Manoel Viana, Palmeira das Missões, Fortaleza dos Valos foram identificadas, acompanhadas e amostradas.

O teor de argila dos solos destas regiões varia de 90 a 720 g kg⁻¹, sendo esta fração constituída por minerais de carga variável, basicamente caulinita, óxidos de ferro, e gibsitita. Segundo classificação climática de Koëppen, as áreas experimentais encontram-se sob clima subtropical.

A Tabela 1 apresenta a caracterização das áreas experimentais e um resumo do tempo de adoção do SPD das áreas e dos sistemas de cultura adotados nas diferentes áreas.

Nas áreas pioneiras na adoção do SPD das principais regiões produtoras de grãos do estado do Rio Grande do Sul foi investigada a mudança de estoque de C (Tabela 1). Para fins de comparação em cada local em área adjacente a área agrícola foi coletada amostras de campo nativo, já que na maioria destas regiões não existe mais áreas sob preparo convencional, que se disponíveis poderiam ser utilizadas como comparativo ao SPD.

Tabela 1 – Descrição das áreas: Localização, tipo de solo, conteúdo de argila, material de origem, clima, uso do solo (sistemas de cultivo), duração do SPD e profundidade de amostragem.

Descrição	Local 1 - Santa Rosa	Local 2 - Manoel Viana	Local 3 - Palmeira das Missões		Local 4 - Lagoa Vermelha	Local 5 - Cruz Alta	Local 6 - Fortaleza dos Valos
Coordenadas geográficas	27°52'S - 54°28'W	29°35'S - 55°28'W	27°53'S - 53°18'W	27°53'S - 53°18'W	28°22'S - 51°50'W	28°38'S - 53°36'W	28°47'S - 53°13'W
Altitude	330 m	113 m	639 m	639 m	840 m	452 m	406 m
Classificação do solo	Latossolo Vermelho	Neossolo Quartzarênico	Latossolo Vermelho	Latossolo Vermelho	Latossolo Vermelho	Latossolo Vermelho Distroférico	Latossolo Vermelho
Argila (g kg ⁻¹)	720	90	600	600	700	570	600
Material de origem	Basalto	Arenítico-basáltica	Basalto	Basalto	Basalto	Arenito	Arenito
Mineralogia - Óxidos de ferro (g kg ⁻¹)	246 (extraído por H ₂ SO ₄)‡	18 (extraído por H ₂ SO ₄)‡	234 (extraído por H ₂ SO ₄)‡	234 (extraído por H ₂ SO ₄)‡	222 (extraído por H ₂ SO ₄)‡	63,5 (extraído por DCB) ‡‡	64 (extraído por DCB) ‡
Clima	Cfa	Cfa	Cfa	Cfa	Cfa	Cfa	Cfa
Temperatura média anual	20,8°C†	20,3°C†	19,6°C‡‡‡	19,6°C‡‡‡	16,8°C†	17,2°C†	19,3°C
Temperatura máxima	26,1°C†	25°C†	39,7°C‡‡‡	39,7°C‡‡‡	22,7°C†	21,5°C†	30,0°C‡‡‡
Temperatura mínima	15,5°C†	13,4°C†	3°C‡‡‡	3°C‡‡‡	12,4°C†	12,8°C†	8,6°C‡‡‡
Precipitação média anual (mm)	1725†	1662†	1625‡‡‡	1625‡‡‡	1735†	1729†	1727‡‡‡
Umidade relativa (%)	74,9†	73,8†	74,1††	74,1†	75,2†	77,9†	70,0†
Uso do solo (Sistemas de cultura)	soja/trigo/soja/aveia preta	trigo/soja /aveia + nabo forrageiro /soja	milho/nabo forrageiro/trigo/soja/aveia preta	milho/nabo forrageiro/trigo/soja/aveia preta	soja/nabo-forrageiro*+aveia/milho/trigo	Aveia + ervilhaca/soja/milho/ nabo forrageiro/trigo	trigo/soja/aveia-preta + nabo forrageiro/milho/nabo forrageiro
Relação soja/milho adotada (anos)	3/1	2/1	2/1	2/1	1/1	1/1	2/1
Intensidade de cultivos	Baixa	média	Alta	Alta	Alta	alta	média
Duração do SPD	20	23	20	33	25	25	25
Adição de biomassa vegetal (Mg há ⁻¹ ano ⁻¹)	6-8	6-8	10-12	10-12	10-12	>12	10-12
Profundidade de amostragem (m)	0-0,05; 0,05-0,15; 0,15-0,30; 0,30-0,45; 0,45-0,60 e 0,60-1,0	Idem ao Local 1	Idem ao Local 1	Idem ao Local 1	Idem ao Local 1	Idem ao Local 1	Idem ao Local 1

‡ Brasil (1973); ‡‡ Campos (2006), ‡‡‡ Moreno (1961)

† média no período de 1976 a 2005. Fonte dos dados: Atlas Climático do Rio Grande do Sul (disponível em www.cemet.rs.gov.br).

* nabo-forrageiro sobressemeado com aviação agrícola, quando a soja encontrava-se em fase de queda de folhas.

2.4.1.2 Histórico de uso e manejo das áreas

De uma maneira geral no Rio Grande do Sul, houve um período de agricultura colonial (entre 1900 e 1965), com preparo de solo predominantemente com tração animal, criação de animais e cultivo de milho (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), lentilha (*Lens culinaris* Medik), mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) e soja (*Glycine max* L. Merrill) (a partir de 1956), entre outras espécies, para subsistência, sendo o cultivo baseado na fertilidade natural do solo. Na década de 1965, teve início o período de agricultura mecanizada, com preparo do solo com aração e gradagem e intensa mobilização deste (preparo convencional, PC), uso de fertilizantes e corretivos químicos, sucessão de cultivos de trigo e soja, além da queima da palha do trigo, causando degradação física do solo. Entre 1981-1990, foram adotadas práticas conservacionistas de manejo do solo, com preparo com escarificador e grade (preparo reduzido), com a palha do trigo deixando de ser queimada e a cultura da aveia passando a dividir espaço com o trigo. Em 1990 teve início o sistema plantio direto (SPD), que vem sendo mantido até os dias atuais. A seguir são mostradas graficamente as cronologias do uso do solo de cada local amostrado (Figuras 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7).

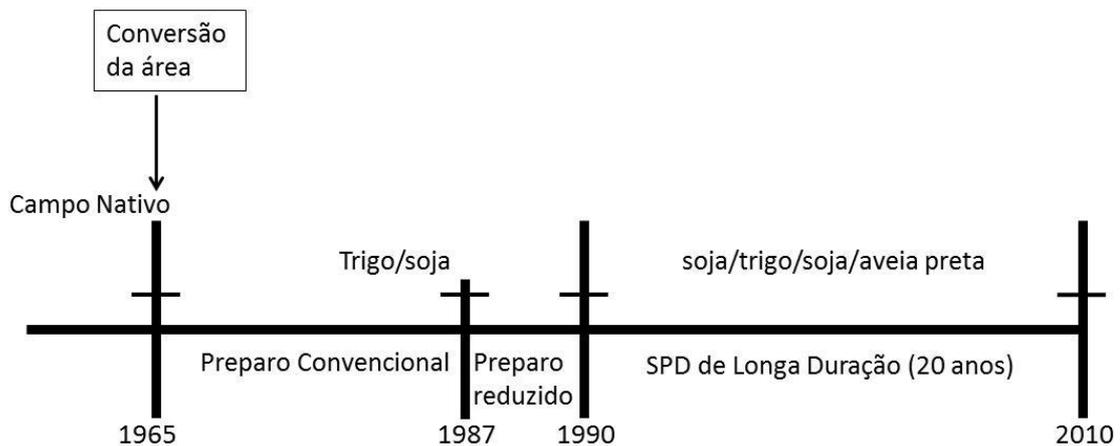


Figura 1 – Local 1. Cronologia do uso do solo na área de Santa Rosa - RS.

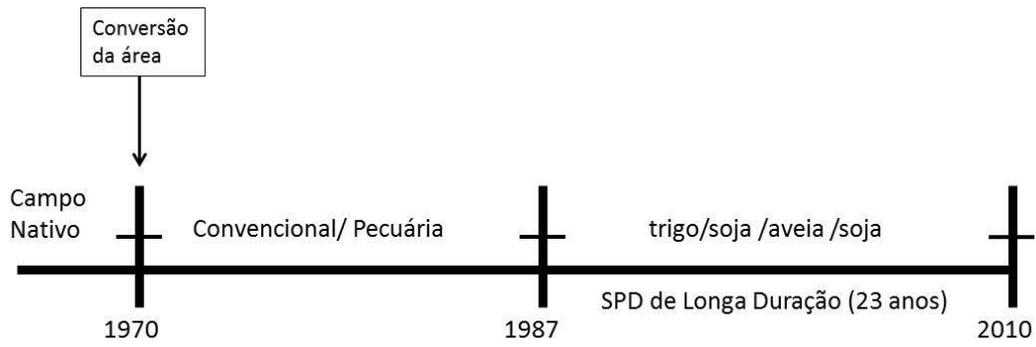


Figura 2 – Local 2. Cronologia do uso do solo na área de Manoel Viana - RS.

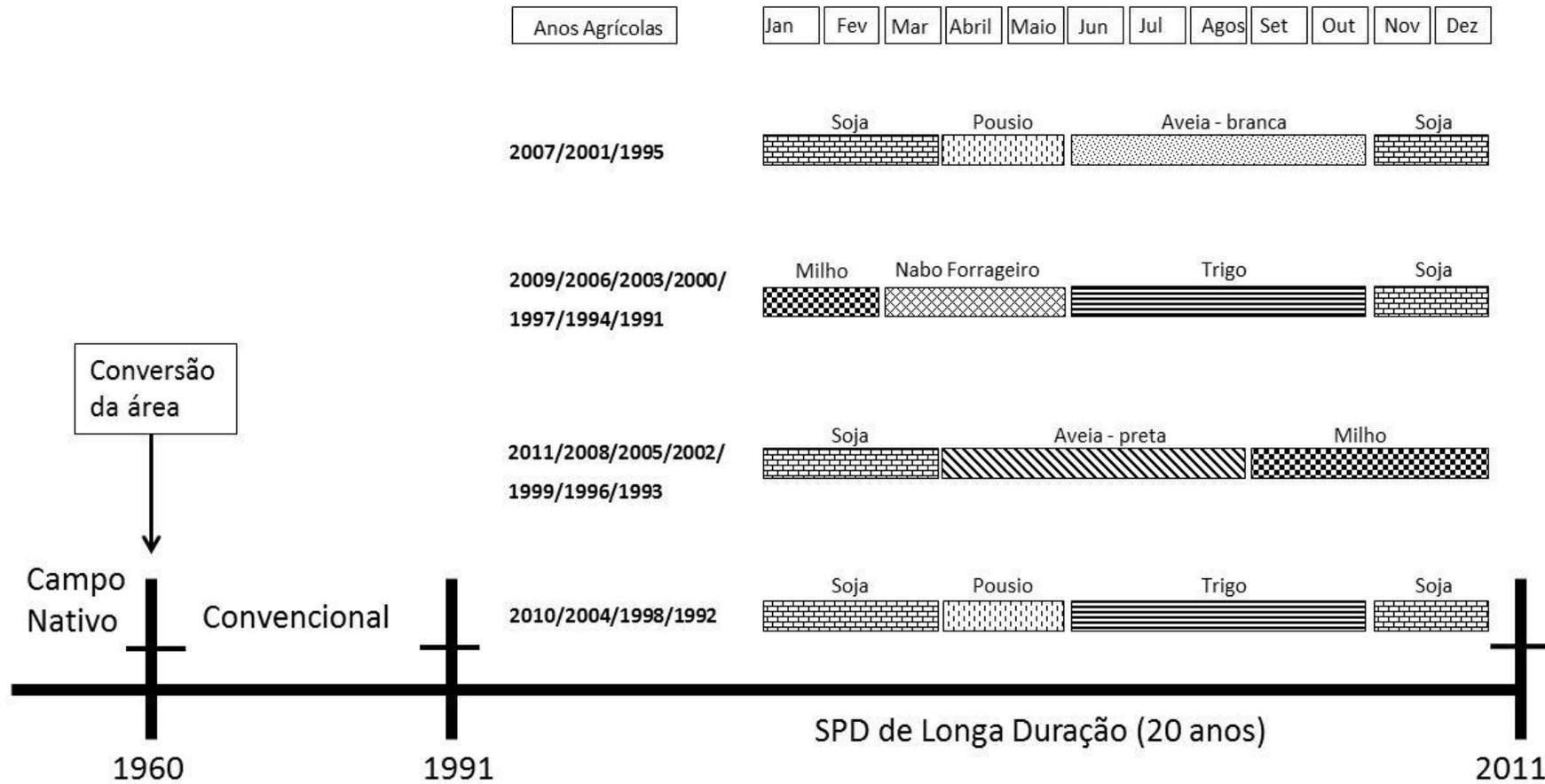


Figura 3 – Local 3. Cronologia do uso do solo na área de Palmeira das Missões (20 anos).

1960 = conversão da vegetação natural em áreas de lavoura; 1970-1978 = culturas (soja no verão e trigo no Inverno) foram cultivadas em preparo convencional; 1991-2011 = milho/nabo-forrageiro/trigo/soja/aveia-preta e/ou branca sob plantio direto de longa duração.

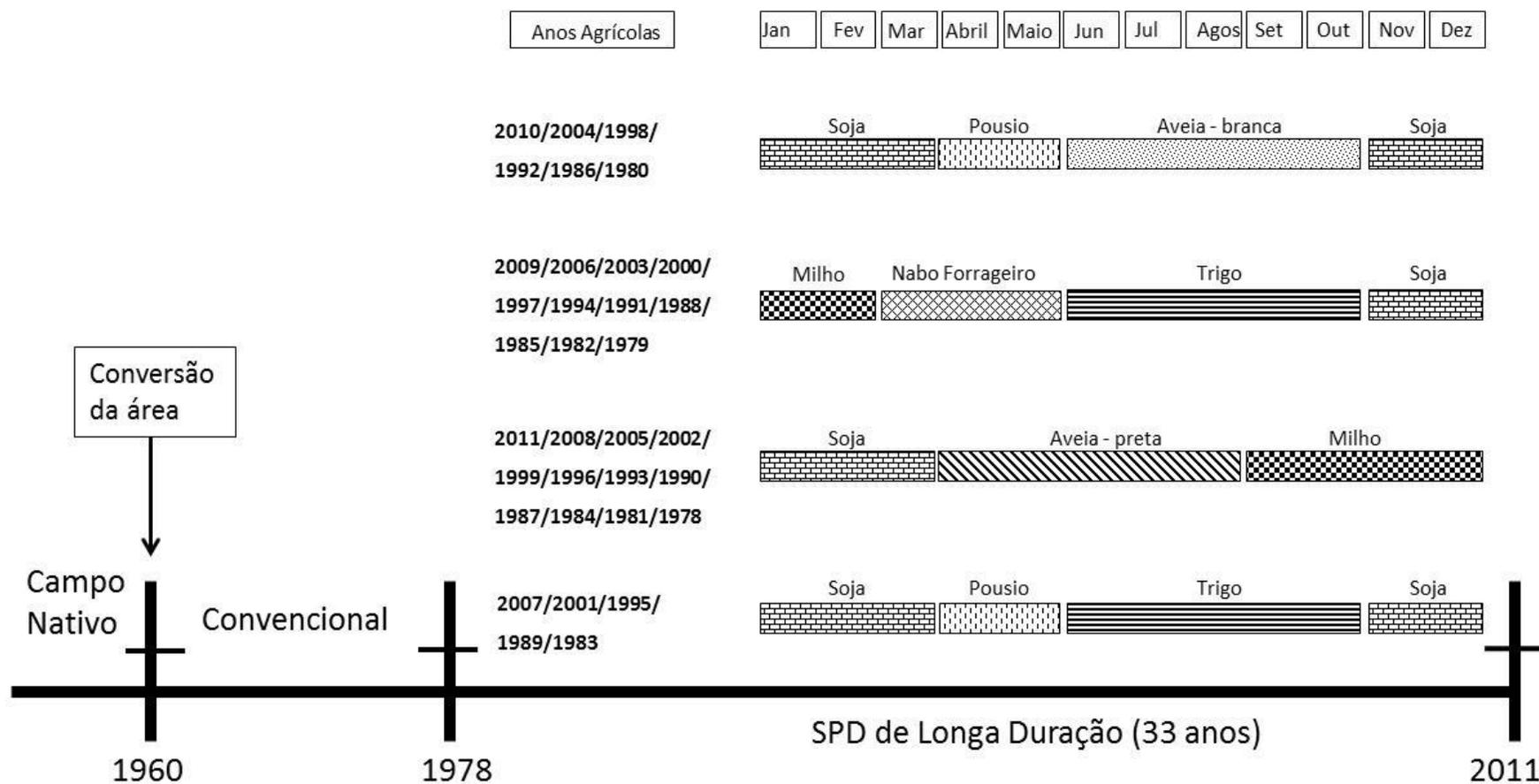


Figura 4 – Local 3. Cronologia do uso do solo na área de Palmeira das Missões (33 anos).

1960 = conversão da vegetação natural em áreas de lavoura; 1970-1978 = culturas (soja no verão e trigo no Inverno) foram cultivadas em preparo convencional; 1978-2011 = milho/nabo-forrageiro/trigo/soja/aveia-preta e/ou branca sob plantio direto de longa duração.

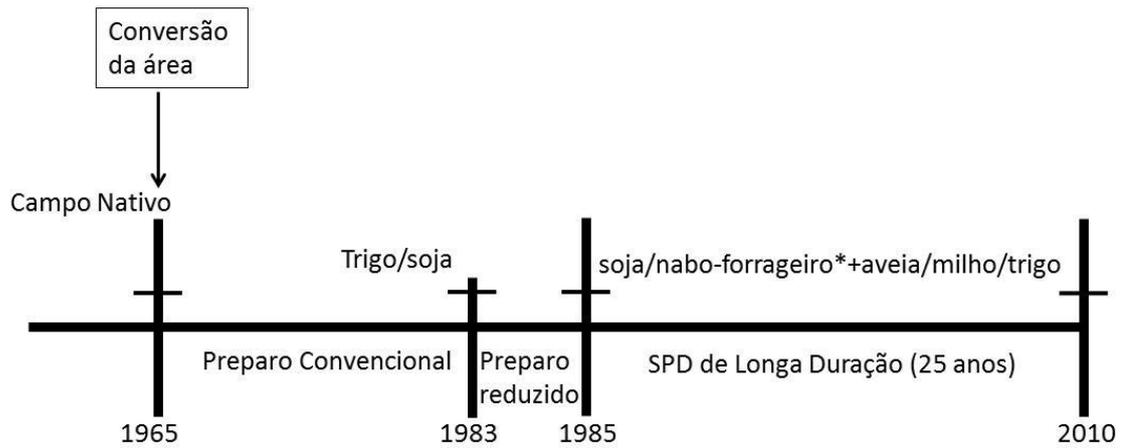


Figura 5 – Local 4. Cronologia do uso do solo na área de Lagoa Vermelha - RS.

* nabo-forrageiro sobressemeado (com aviação agrícola) quando a soja encontrava-se em fase de queda de folhas

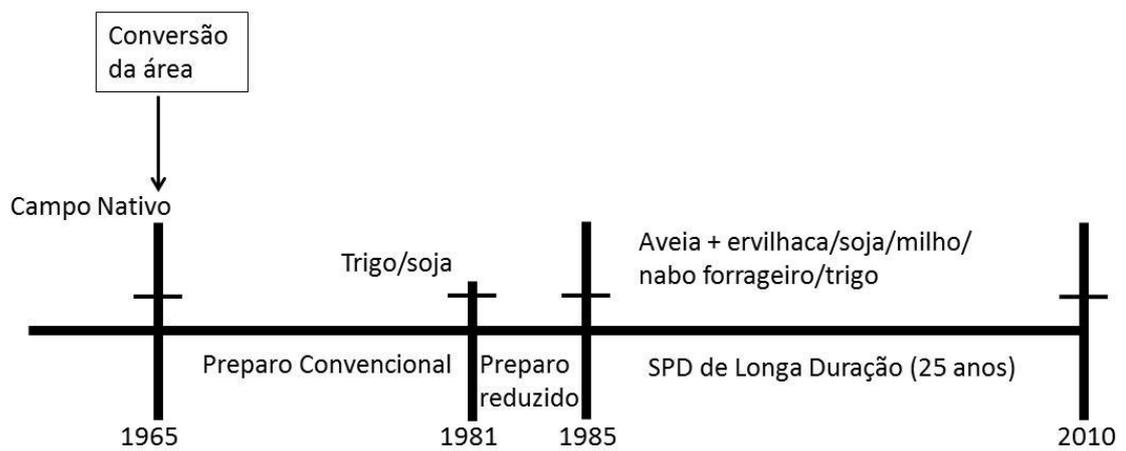


Figura 6 – Local 5. Cronologia do uso do solo na área de Cruz Alta - RS.

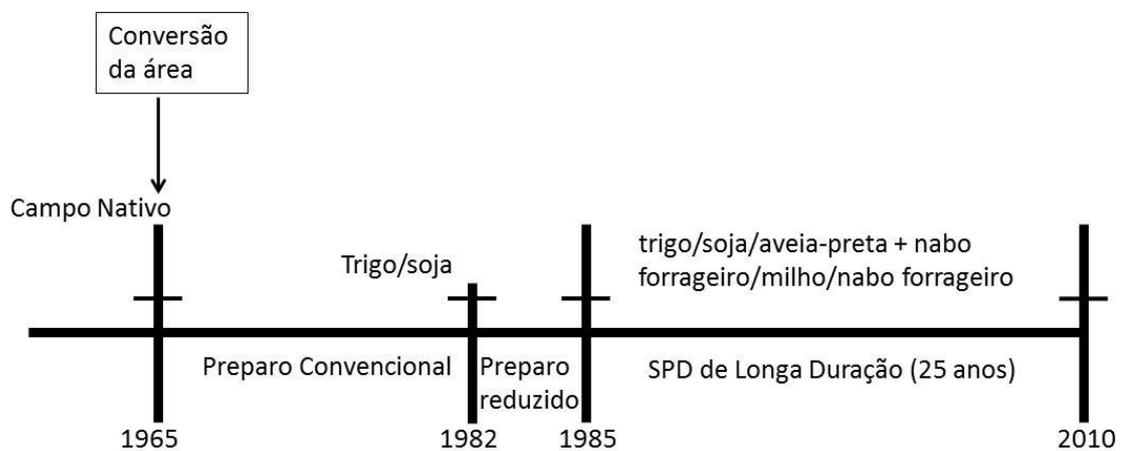


Figura 7 – Local 6. Cronologia do uso do solo na área de Fortaleza dos Valos - RS.

2.4.1.3 Caracterização e descrição da vegetação nativa

A classificação e denominação da vegetação nativa da maioria das áreas amostradas no Rio Grande do Sul foram classificadas como Estepe (Campos do sul do Brasil), gramíneo lenhosa (campestre) e sem floresta de galeria (Figura 8) conforme mapa RADAMBRASIL. Na área de Santa Rosa, classificada como descrito anteriormente, a amostragem foi feita sob vegetação de campo nativo pareado ao SDP, uma vez que são escassas as áreas de Floresta nativa dessa região.

Cabe ressaltar que os campos do Rio Grande do Sul são bastante heterogêneos. Isto justifica a divisão dos campos desde o paralelo 30°S até uma subdivisão mais detalhada, levando em consideração aspectos geomorfológicos e da composição florística: i) os Campos de barba-de-bode, sobre o Planalto das Missões e os Campos de Cima da Serra, no Planalto das Araucárias, ambos ao norte do paralelo 30°S; ii) os Campos da Campanha, sobre o Planalto da Campanha, os Campos do Litoral, na Planície Costeira, os Campos da Depressão, na Depressão Central e os Campos da Serra do Sudeste, no Planalto Sul-rio-grandense, estes ao sul do paralelo 30°S (BOLDRINI, 1997; LONGHI-WAGNER, 2003).

Quanto à produção de matéria seca (MS) na estação quente do ano, observou-se de 2,0 a 3,4 Mg ha⁻¹ de MS/ em pastagem nativa (PILLAR et al., 2009).

Unidades de Vegetação Rio Grande do Sul - RADAM

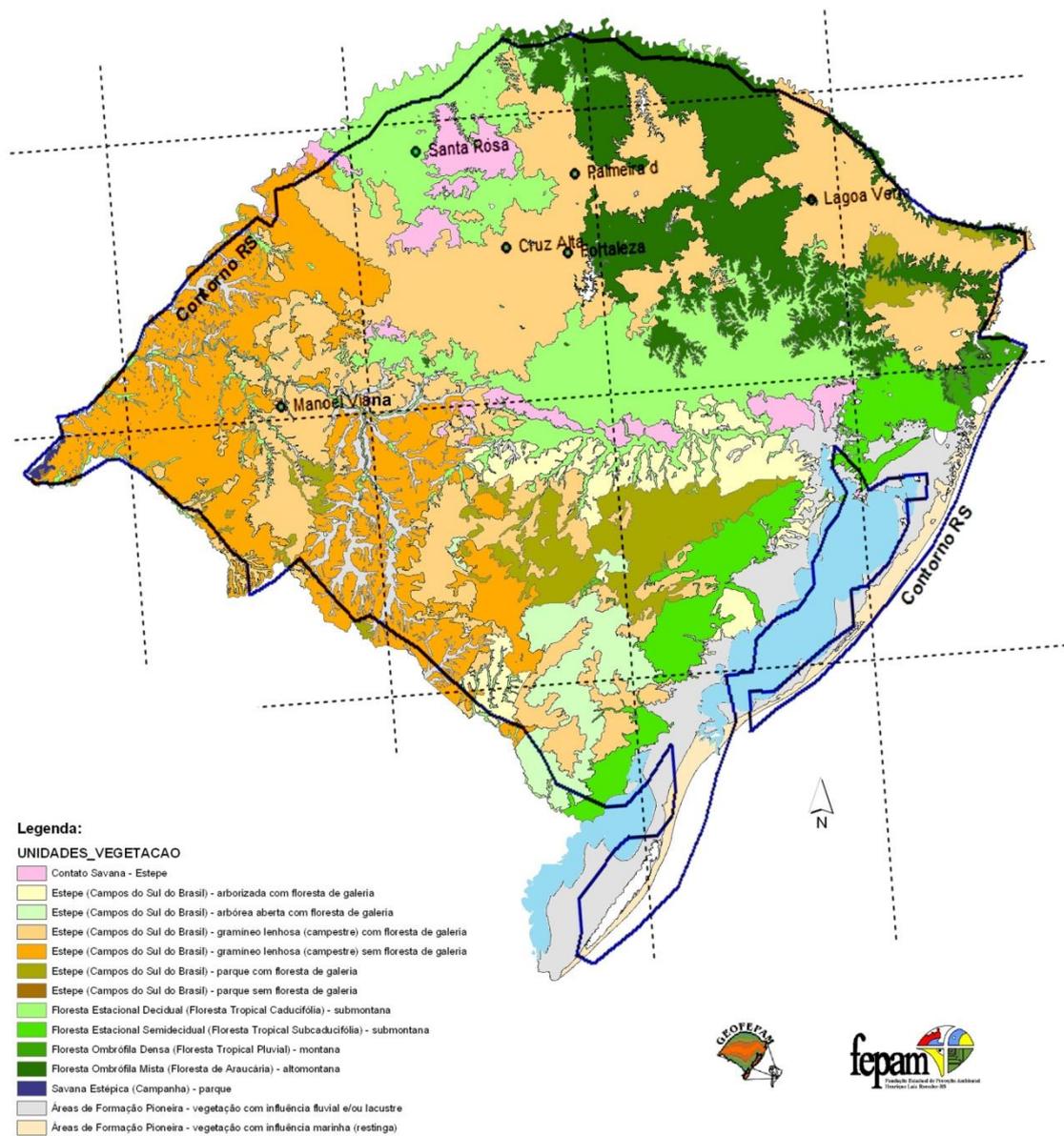


Figura 8 – Mapa dos pontos das áreas amostradas sobrepostos sobre o mapa de vegetação do Rio Grande do Sul.

2.4.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados. Os sistemas de manejo considerados foram: (a) Plantio Direto de longa duração (> 20 anos); Vegetação campo nativo (Figura 9).

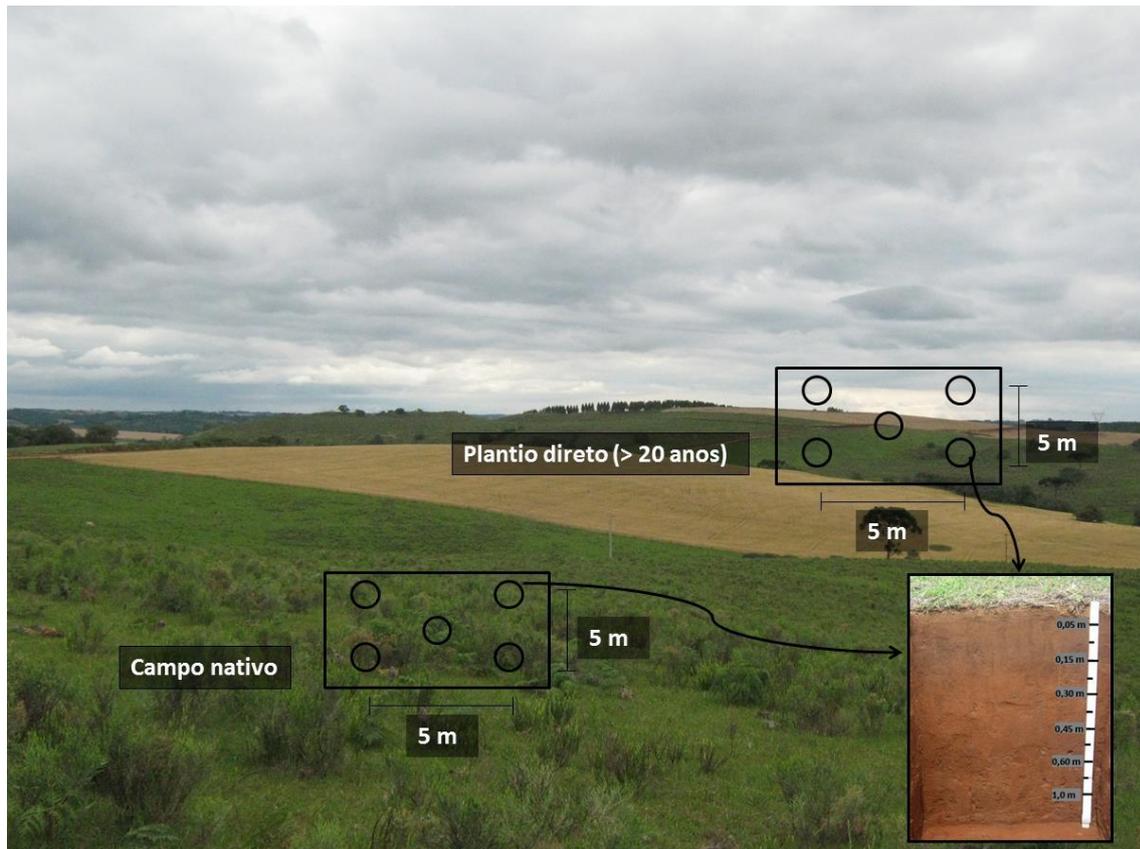


Figura 9 – Detalhe do procedimento de amostragem das áreas.

2.4.3 Amostragem de solo

As amostras de solo foram coletadas em cada área nas camadas 0-0,05; 0,05-0,15; 0,15-0,30; 0,30-0,45; 0,45-0,60 e 0,60-1,0 m de profundidade. As amostras para fertilidade do solo foram secas ao ar, passadas em uma peneira de malha 2 mm, as raízes encontradas foram removidas manualmente e as amostras de solo excedente foram armazenadas para utilização nas futuras análises.

2.4.4 Determinação do conteúdo de carbono (C) no solo e densidade do solo

As amostras de solo destinadas à determinação do conteúdo de C foram coletadas manualmente, mediante abertura de pequenas trincheiras com dimensões de 0,3 x 0,3 x 0,4 m. As amostras do solo foram coletadas com uma espátula na parede frontal da trincheira. As amostras foram secas ao ar e manipuladas visando à retirada de raízes e resíduos de plantas.

As amostras de solo destinadas à determinação do conteúdo de C foram finamente moídas em gral de porcelana. O COT foi determinado por combustão úmida pelo método Mebius modificado no bloco de digestão (NELSON & SOMMERS, 1996; REINHEIMER et al., 2008).

Para determinar a densidade do solo amostras indeformadas foram coletadas nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,15; 0,15-0,30; 0,30-0,45; 0,45-0,60 e 0,60-1,0 m, com anéis volumétricos com dimensões de 0,05 m de diâmetro e 0,04 m de altura (EMBRAPA, 1997). Os resultados da densidade do solo foram utilizados para o cálculo do estoque de C

2.4.5 Cálculo do estoque de C, balanço de C no solo e fracionamento da matéria orgânica do solo (COP e COAM)

Os estoques de C foram calculados, com base no método de massa equivalente de solo (ELLERT & BETTANY, 1995), tomando como referência a massa de solo da vegetação Campo Nativo.

O balanço de C no solo foi calculado para avaliar as alterações de estoque de C no solo em relação ao campo nativo, onde uma área vizinha de vegetação nativa pareada de todas as áreas amostradas foi usada como referência para o cálculo.

Para o cálculo do fracionamento da matéria orgânica do solo (carbono orgânico particulado-COP e carbono associado aos minerais-COAM) frascos snap-cap foram pesados 20 g do solo e adicionado 70 mL de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}) e, colocados por 16 h no agitador horizontal (CAMBARDELLA & ELLIOT, 1992). Posteriormente, o material foi passado numa peneira de 53 μm (0,053 mm), com o auxílio de jato fraco de água, para separar a fração areia mais material orgânico das frações silte e argila. O material retido na peneira foi considerado a fração particulada (grosseira) e o material que passa constituiu a fração associada aos minerais. O material retido foi transferido para recipientes metálicos e secos a 60°C. As concentrações de C nas amostras fracionadas foram determinadas por combustão seca utilizando um auto-analisador CN Soil Flash Elemental Analyser EA 1112 Series

(ThermoFinnigan Itália, S.p.A., MI, Itália), obtendo-se, após a análise, o C orgânico particulado (COP), na fração > 53 µm. O C orgânico total associado aos minerais (COAM), na fração < 53 µm foi determinado matematicamente pelo cálculo da diferença entre as concentrações e estoques do C orgânico total no solo e o C orgânico total da fração particulada.

2.4.6 Análise estatística

Os resultados serão submetidos à análise de variância utilizando o software SISVAR 5.0 (FERREIRA, 2010), e as médias serão comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

2.5 Resultados e discussão

2.5.1 Densidade do solo

Em todas as áreas amostradas houve uma área vizinha de vegetação nativa pareada, que foi usada como referência para avaliar as alterações na densidade do solo e estoques de carbono (C).

Em todas as áreas amostradas (Tabela 2) também houve incremento de densidade no sistema plantio direto de longa duração em relação à vegetação de campo nativo. Isto decorre, principalmente, do arranjo natural do solo, quando não é mobilizado, e da pressão provocada pelo trânsito de máquinas e implementos agrícolas, sobretudo quando realizado em solos argilosos como é o caso do presente estudo (VIEIRA & MUZILLI, 1984; CORRÊA, 1985).

No presente estudo, observando todas as áreas amostradas (Tabela 2), os locais 1 (Santa Rosa), 3 (Palmeira das Missões) e 6 (Fortaleza dos Valos) apresentaram para a camada superficial densidade do solo acima da crítica conforme proposto por Reichert et al. (2003), que atribuíram a densidade crítica de acordo com a classe textural (1,30 a 1,40 Mg m⁻³ para solos argilosos, 1,40 a 1,50 Mg m⁻³ para os franco-argilosos e de 1,70 a 1,80 Mg m⁻³ para os franco-arenosos). Em Santa Rosa e Palmeira das Missões a camada compactada foi de 0,05-0,15 m variando de 1,44 a 1,56 Mg m⁻³ de densidade, enquanto que em Fortaleza dos Valos essa camada foi de 0,05-0,30 m de profundidade variando de 1,43 a 1,59 Mg m⁻³.

Em Santa Rosa nota-se elevadas densidades em todo perfil do solo quando comparado com o campo nativo vizinho, e isso deve estar associada ao histórico dessa área com intensificação da soja (3 cultivos de soja/1 cultivo de milho) (Tabela 1, Figura 1). Dados estes respaldados por Gomes et al. (1978), que verificaram maiores valores de densidade do solo na sucessão soja-trigo que na milho-trigo ou nos cultivos contínuos de soja, trigo ou milho. Já Albuquerque et al., (1995) verificaram que a sucessão soja-trigo propiciou maiores valores de densidade do solo na camada superficial que as rotações que incluíam outras culturas como a aveia, ervilhaca e milho. No local 4 (Manoel Viana) o Neossolo Quartzarênico apresentou densidade do solo dentro dos limites críticos.

Tabela 2 – Variação da densidade do solo (Mg m^{-3}) em diferentes profundidades das áreas amostradas e das áreas vizinhas com campo nativo.

Profundidade (m)	Local 1 - Santa Rosa		Local 2 - Manoel Viana		Local 3 - Palmeira das Missões			Local 4 - Lagoa Vermelha		Local 5 - Cruz Alta		Local 6 – Fortaleza dos Valos
	CN†	SPD††	CN	SPD	CN	SPD*	SPD**	CN	SPD	CN‡	SPD	SPD
0-0,05	1,09	1,36	1,51	1,61	1,06	1,31	1,31	0,87	0,99	1,29	1,16	1,30
	±0,12	±0,11	±0,06	±0,08	±0,17	±0,22	±0,03	±0,09	±0,06	±0,20	±0,07	±0,11
0,05-0,15	1,19	1,44	1,64	1,78	1,25	1,56	1,55	1,05	1,16	1,25	1,37	1,59
	±0,16	±0,08	±0,07	±0,03	±0,05	±0,03	±0,01	±0,07	±0,05	±0,07	±0,03	±0,05
0,15-0,30	1,19	1,39	1,62	1,78	1,23	1,38	1,39	1,10	1,14	1,23	1,36	1,43
	±0,07	±0,05	±0,09	±0,08	±0,02	±0,07	±0,05	±0,04	±0,05	±0,03	±0,05	±0,08
0,30-0,45	1,18	1,37	1,62	1,71	1,21	1,27	1,28	1,12	1,13	1,20	1,34	1,35
	±0,10	±0,02	±0,09	±0,12	±0,07	±0,04	±0,01	±0,04	±0,01	±0,13	±0,06	±0,07
0,45-0,60	1,16	1,31	1,60	1,59	1,21	1,24	1,25	1,11	1,12	1,19	1,28	1,29
	±0,03	±0,05	±0,13	±0,09	±0,07	±0,07	±0,04	±0,01	±0,02	±0,10	±0,06	±0,07
0,60-1,0	1,24	1,28	1,56	1,52	1,13	1,24	1,25	1,09	1,10	1,15	1,31	1,21
	±0,06	±0,08	±0,09	±0,11	±0,09	±0,06	±0,03	±0,01	±0,06	±0,04	±0,06	±0,03

† CN = Campo Nativo; †† SPD = Sistema plantio direto; * Sistema plantio direto de 20 anos; ** Sistema plantio direto de 33 anos. ‡ Dados adaptados de Jantalia et al. (2005).

2.5.2 Concentrações de carbono no solo

As concentrações de carbono no solo (g kg^{-1}) diminuíram expressivamente com o aumento de profundidade e mostraram diferentes padrões de distribuição no perfil entre os manejos do solo dos locais amostrados. No local 1 (Santa Rosa), a concentração de carbono no SPD variou em média de $22,4 (\pm 3,36) \text{ g kg}^{-1}$ na camada de 0-5 cm a $4,7 (\pm 0,31) \text{ g kg}^{-1}$ na camada de 60-100 cm. Para campo nativo (CN), essa variação média foi de $33,7 (\pm 2,68)$ a $9,1 (\pm 2,01) \text{ g kg}^{-1}$, para as camadas de 0-5 e 60-100 cm, respectivamente (Tabela 3). Estas concentrações foram altamente estratificadas com a profundidade sob SPD e CN (Tabela 3). As concentrações de carbono foram significativamente inferiores no SPD em relação ao CN em todas as camadas amostradas (Tabela 3).

No local 2 (Manoel Viana), a concentração de carbono no SPD variou em média de $11,2 (\pm 1,13) \text{ g kg}^{-1}$ na camada de 0-5 cm a $4,6 (\pm 1,66) \text{ g kg}^{-1}$ na camada de 60-100 cm. Para CN, essa variação média foi de $7,8 (\pm 1,43)$ a $4,0 (\pm 1,66) \text{ g kg}^{-1}$, para as camadas de 0-5 e 60-100 cm, respectivamente (Tabela 3). As concentrações de carbono foram significativamente superiores no SPD em relação ao CN na camada de 0-5 cm de profundidade. Nas demais camadas as concentrações foram iguais estatisticamente para ambos os manejos (Tabela 3).

No local 3 (Palmeira das Missões), a concentração de carbono no SPD (33 anos) variou em média de $28,6 (\pm 1,05) \text{ g kg}^{-1}$ na camada de 0-5 cm a $9,3 (\pm 0,11) \text{ g kg}^{-1}$ na camada de 60-100 cm. Para SPD (20 anos), essa variação média foi de $27,6 (\pm 2,91)$ a $9,1 (\pm 0,50) \text{ g kg}^{-1}$, para as camadas de 0-5 e 60-100 cm, respectivamente (Tabela 3). Para CN, essa variação média foi de $22,9 (\pm 0,94)$ a $10,8 (\pm 0,84) \text{ g kg}^{-1}$, para as camadas de 0-5 e 60-100 cm, respectivamente (Tabela 3). As concentrações de carbono foram significativamente superiores no SPD (20 e 33 anos) em relação ao CN na camada de 0-5 cm de profundidade. Nas demais camadas as concentrações de C do CN foram superiores estatisticamente em relação ao SPD (20 e 33 anos) (Tabela 3).

No local 4 (Lagoa Vermelha), a concentração de carbono no SPD variou em média de $45,7 (\pm 2,47) \text{ g kg}^{-1}$ na camada de 0-5 cm a $15,1 (\pm 1,03) \text{ g kg}^{-1}$ na camada de 60-100 cm. Para CN, essa variação média foi de $44,1 (\pm 1,85)$ a $9,3 (\pm 1,61) \text{ g kg}^{-1}$, para as camadas de 0-5 e 60-100 cm, respectivamente (Tabela 3). As concentrações de carbono foram estatisticamente iguais no SPD em relação ao CN nas camadas de 0-5 e 15-30 cm de profundidade. A partir da camada 0,30 cm até 100 cm houve aumento significativo nas concentrações de carbono do SPD em relação ao CN (Tabela 3).

No local 5 (Cruz Alta), a concentração de carbono no SPD variou em média de 30,2 (\pm 2,03) g kg⁻¹ na camada de 0-5 cm a 10,5 (\pm 0,82) g kg⁻¹ na camada de 60-100 cm. Para CN, essa variação média foi de 25,8(\pm 0,70) a 9,0 (\pm 0,68) g kg⁻¹, para as camadas de 0-5 e 60-100 cm, respectivamente (Tabela 3). As concentrações de carbono foram estatisticamente superiores no SPD em relação ao CN nas camadas de 0-5 e 60-100 cm de profundidade. Nas demais camadas as concentrações de C do CN foram superiores estatisticamente em relação ao SPD (Tabela 3).

No local 6 (Fortaleza dos Valos), a concentração de carbono no SPD variou em média de 22,8 (\pm 2,45) g kg⁻¹ na camada de 0-5 cm a 8,7 (\pm 0,92) g kg⁻¹ na camada de 60-100 cm. Para CN, essa variação média foi de 25,8(\pm 0,70) a 9,0 (\pm 0,68) g kg⁻¹, para as camadas de 0-5 e 60-100 cm, respectivamente (Tabela 3). As concentrações de carbono foram iguais estatisticamente no SPD e CN na camada de 60-100 cm de profundidade. Nas demais camadas as concentrações de C do CN foram superiores estatisticamente em relação ao SPD (Tabela 3).

Tabela 3 – Concentrações de carbono orgânico do solo (g kg^{-1}) em diferentes profundidades das áreas amostradas e das áreas vizinhas com campo nativo.

Profundidade (m)	Local 1 - Santa Rosa		Local 2 - Manoel Viana		Local 3 - Palmeira das Missões			Local 4 - Lagoa Vermelha		Local 5 - Cruz Alta		Local 6 – Fortaleza dos Valos	
	CN†	SPD††	CN	SPD	CN	SPD*	SPD**	CN	SPD	CN‡	SPD	CN‡	SPD
0-0,05	33,69 a ±2,68	22,38 b ±3,36	7,80 b ±1,43	11,22 a ±1,13	22,92 b ±0,94	27,67 a ±2,91	28,59 a ±1,05	44,14 a ±1,85	45,70 a ±2,47	25,80 b ±0,70	30,19 a ±2,03	25,80 a ±0,70	22,82 b ±2,45
0,05-0,15	23,75 a ±1,52	14,91 b ±1,76	6,76 a ±2,00	5,67 a ±1,64	17,73 a ±0,49	14,87 b ±0,62	15,75 b ±0,24	33,24 a ±2,12	27,97 b ±2,16	21,00 a ±0,49	18,27 b ±1,20	21,00 a ±0,49	14,98 b ±1,28
0,15-0,30	16,38 a ±1,21	11,24 b ±1,71	5,56 a ±2,45	5,17 a ±1,04	16,40 a ±0,62	12,97 b ±1,00	13,10 b ±0,62	25,27 a ±2,51	25,37 a ±1,72	18,00 a ±0,31	16,64 b ±0,83	18,00 a ±0,31	12,16 b ±1,23
0,30-0,45	13,35 a ±1,72	8,22 b ±0,63	4,91 a ±2,49	6,00 a ±1,66	14,99 a ±1,21	11,94 b ±0,93	12,53 b ±0,35	17,41 b ±1,04	23,37 a ±2,30	16,00 a ±0,21	13,75 b ±0,62	16,00 a ±0,21	10,99 b ±1,58
0,45-0,60	11,54 a ±0,49	5,62 b ±0,15	4,29 a ±1,70	5,06 a ±1,27	12,89 a ±0,83	10,52 b ±0,89	10,73 b ±0,77	14,26 b ±1,34	19,02 a ±2,24	13,00 a ±0,52	11,95 b ±0,88	13,00 a ±0,52	9,98 b ±1,49
0,60-1,0	9,10 a ±2,01	4,74 b ±0,31	4,00 a ±1,66	4,67 a ±1,39	10,85 a ±0,84	9,15 b ±0,50	9,29 b ±0,11	9,27 b ±1,61	15,12 a ±1,03	9,00 b ±0,68	10,52 a ±0,82	9,00 a ±0,68	8,69 a ±0,92

† CN = Campo Nativo; †† SPD = Sistema plantio direto; * Sistema plantio direto de 20 anos; ** Sistema plantio direto de 33 anos. ‡ Dados adaptados de Jantalia et al. (2005).

Médias seguidas por letras iguais, minúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância. (Comparação entre sistemas de manejo (CN x SPD) na mesma profundidade e local).

2.5.3 Estoques de C no solo

No local 1 (Santa Rosa), o estoque de C do SPD variou em média de 12,3 ($\pm 2,13$) Mg ha⁻¹ na camada de 0-5 cm a 23,4 ($\pm 1,93$) Mg ha⁻¹ na camada de 60-100 cm. Para CN, essa variação média foi de 18,5 ($\pm 3,24$) a 45,0 ($\pm 2,59$) Mg ha⁻¹, para as camadas de 0-5 e 60-100 cm, respectivamente (Figura 10). O estoque de C acumulado do SPD variou em média de 30,7 ($\pm 4,96$) Mg ha⁻¹ na camada de 0-15 cm a 99,8 ($\pm 5,23$) Mg ha⁻¹ na camada de 0-100 cm. Para CN, essa variação média foi de 46,8 ($\pm 6,78$) a 164,8 ($\pm 8,17$) Mg ha⁻¹, para as camadas de 0-15 e 0-100 cm.

Os estoques de C foram significativamente inferiores no SPD em relação ao CN em todas as camadas amostradas (Figura 10), exceto na camada de 0-5 cm, que apesar do CN apresentar 6,15 Mg ha⁻¹ de C a mais que o SPD, isso não foi estatisticamente significativo (Tukey $p < 0,005$). Estes dados representam uma recuperação de C (aqui denominado como a quantidade de estoque de C (%) faltante para igualar o estoque de C do CN) de 67, 66, 68, 67, 64 e 61%, respectivamente, para as camadas de 0-5; 0-15; 0-30; 0-45; 0-60; 0-100 cm de profundidade (Figura 11). Esses dados de recuperação de C estão de acordo com os dados das principais áreas experimentais de longa duração do Rio Grande do Sul que variaram de 64,2 a 96,2 % para camada de 0-30 cm (Tabela 4).

Considerando o campo nativo como base, a percentagem de recuperação do estoque de C para o SPD foi de 67, 65, 72, 62, 49 e 52% para as camadas de 0-5, 5-15, 15-30, 30-45, 45-60 e 60-100 cm. Analisando as camadas acumuladas a percentagem de recuperação do estoque de C para o SPD (20 anos) foi de 65, 68, 67, 64 e 61% para as camadas de 0-15, 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm.

Além disso, as mudanças do manejo do solo impactaram significativamente nos estoques de C (Figura 11). Por exemplo, o estoque médio de C na camada de 0-30 cm de profundidade diminuiu de 76 Mgha⁻¹ em CN para 51,7 Mgha⁻¹ em SPD e de 164,8 Mgha⁻¹ para 99,8 Mgha⁻¹ na camada de 0-100 cm. A partir destes dados valores, pôde-se calcular a taxa de acúmulo anual de carbono decorrente desde a conversão da área para agricultura (somando aproximadamente 22 anos de sistema convencional + 3 anos de preparo reduzido + 20 anos de SPD) (Figura 1), que foi de - 0,14; -0,36; - 0,54; - 0,74; - 0,96 e -1,44 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente para as camadas de 0-5, 0-15, 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm de profundidade. Tal fato indica que as taxas de acúmulo de C estão ainda abaixo do campo nativo nessas camadas. Sá et al. (2014) observaram que o estoque médio de C na camada 0-20 cm de profundidade diminuiu de 94,9 Mg ha⁻¹ sob CN para 62,9 Mg ha⁻¹ para o preparo

convencional (PC) em 1989, e atingiu o valor de 67,8 Mg ha⁻¹ em 2005, uma perda de 29% em mais de 38 anos desde que o conversão do CN em campo cultivado com a utilização de PC. Esse declínio do estoque de carbono sob PC representou uma taxa de esgotamento de 0,60 e 1,07 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ em 0-20 e 0-40 cm de profundidade, respectivamente.

O declínio no presente estudo poderia ser explicado devido o histórico da área (Figura 1), que apresenta 22 anos de preparo convencional e 20 anos de SPD com baixa intensidade de culturas (soja/trigo/soja/aveia-preta) manejado com intensificação da soja (3 cultivos de soja/1 cultivo de milho), além de média adição de C (6-8 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) de carbono via resíduo. Esses resultados evidenciam a maior frequência de soja e menor do milho ao longo dos anos e são respaldados por Amado et al. (2006), Sá et al. (2008), Campos et al. (2011) e Ferreira et al. (2012) que afirmaram que quando da ausência e/ou menor frequência da cultura do milho na rotação, o sistema apresenta-se deficitário em C, porque a taxa de acúmulo está diretamente associada a produção de biomassa. Qualquer variação climática que reduza as adições de C (como é o caso do presente local) poderá resultar em balanço negativo. Este fato foi relatado também por Bayer et al. (2011), que verificaram acúmulo de aproximadamente 0,15 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de C na média dos sistemas de culturas de verão que incluíam o milho, e redução de 0,27 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de C quando em monocultura de soja, que foi a realidade por algum tempo desse local. Esse argumento também foi respaldado por Amado et al. (2006) e Campos et al. (2011) em condições subtropicais que mostraram que a introdução da cultura de milho na rotação e quando associada com leguminosas como cultura antecessora aumenta expressivamente o potencial de acúmulo de C.

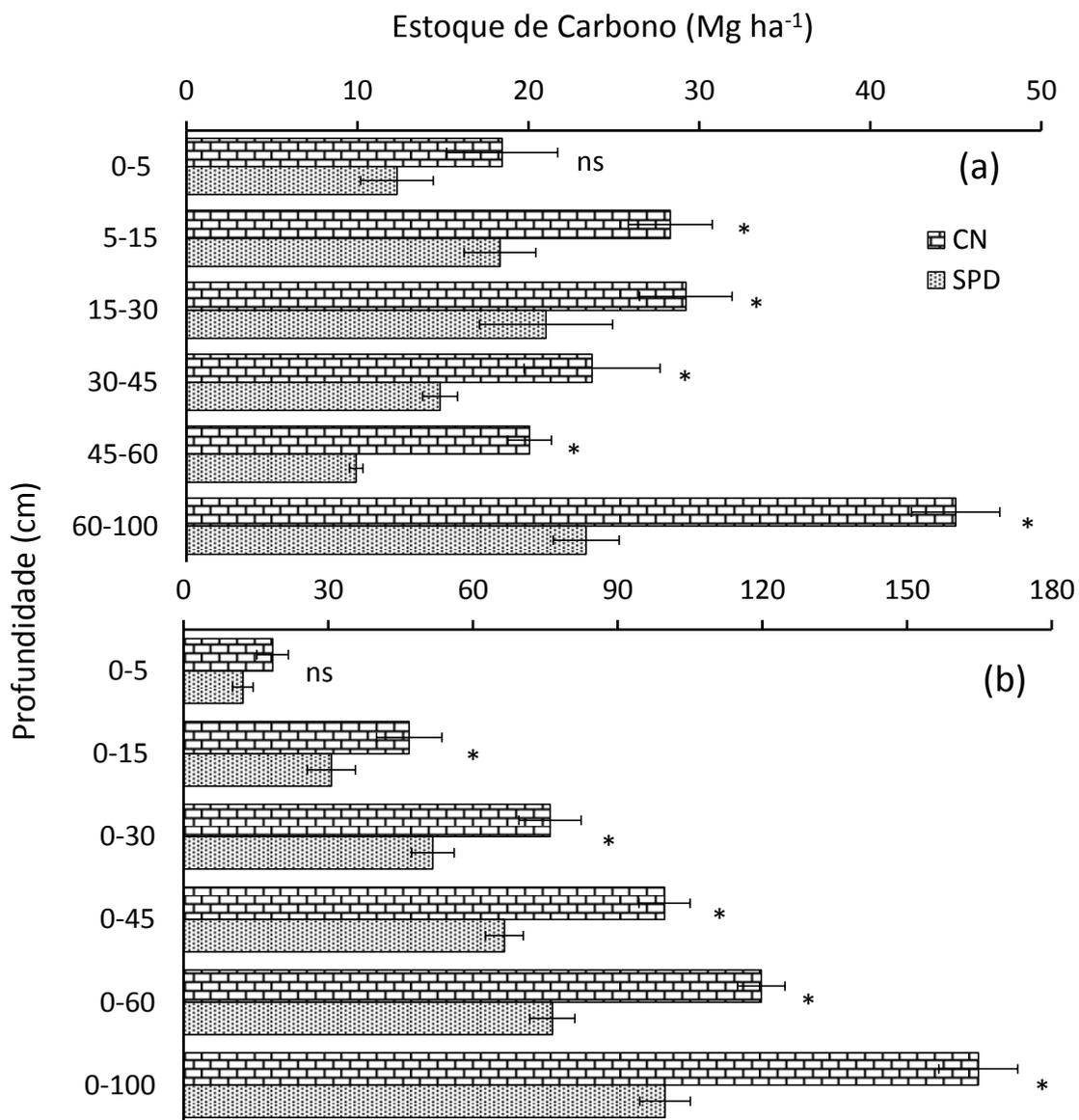


Figura 10 – Estoque de C (Mg ha^{-1}) em Latossolo Vermelho argiloso sob SPD de longa duração (Santa Rosa – RS) e em campo nativo vizinho. a) Estoque de C estratificado e b) Estoque de C acumulado. CN = Campo Nativo; SPD = Sistema plantio direto.

^{ns} Não-significativo. *Significativo a 5% de significância (Tukey). (Comparação entre sistemas de manejo na mesma profundidade).

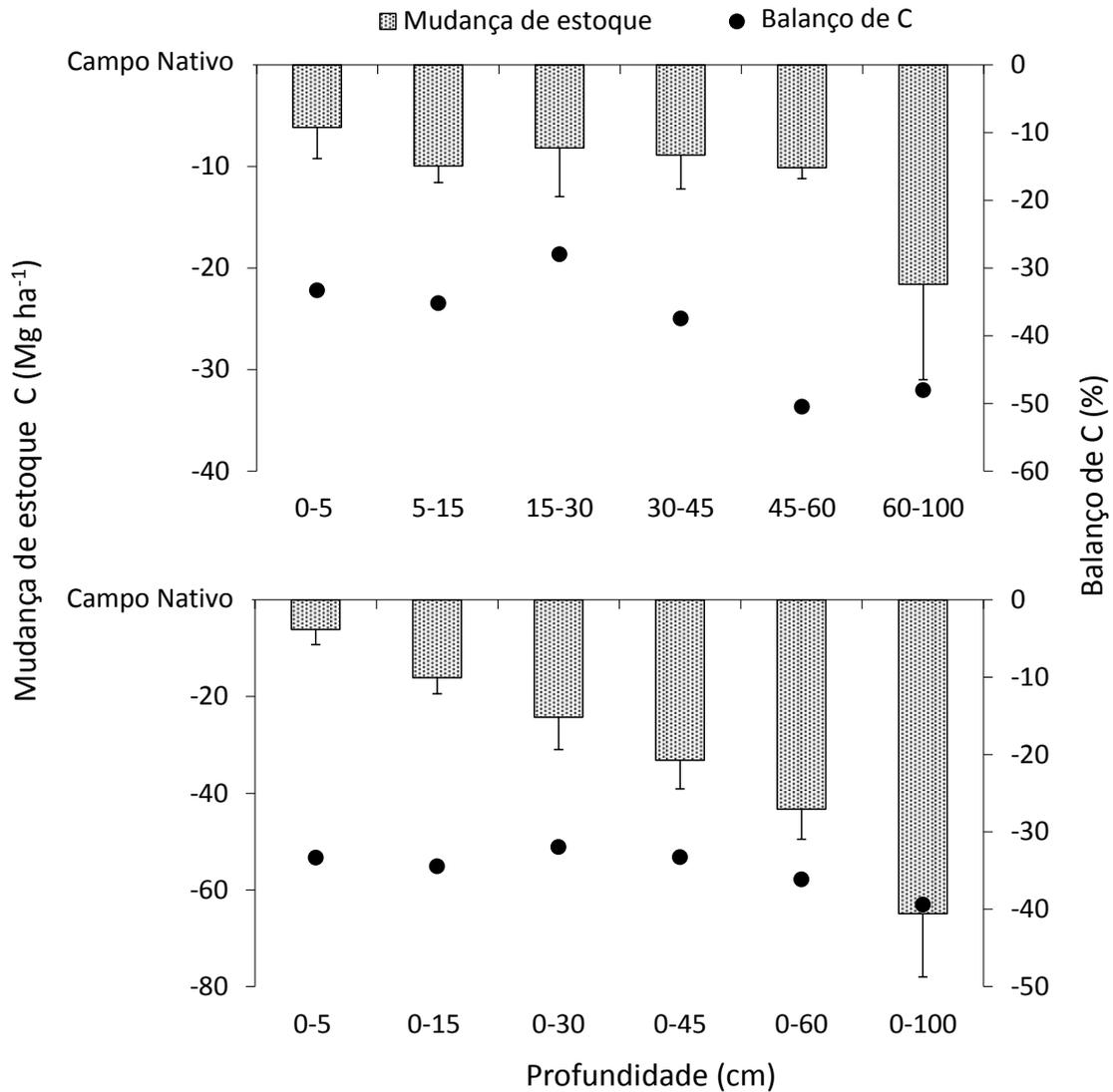


Figura 11 – Mudança de estoque de C (Mg ha⁻¹) e Balanço de C (%) após 20 anos de SPD (soja/trigo/soja) em Latossolo Vermelho argiloso (Santa Rosa – RS). a) camada estratificada e b) camada acumulada. As barras de erro indicam a variação das amostras. Os valores são médias de cinco repetições.

No local 2 (Manoel Viana), o estoque de C do SPD variou em média de 8,5 (\pm 0,93) Mg ha⁻¹ na camada de 0-5 cm a 22,9 (\pm 2,5) Mg ha⁻¹ na camada de 60-100 cm. Para CN, essa variação média foi de 5,9 (\pm 0,99) a 32,4 (\pm 2,2) Mg ha⁻¹, para as camadas de 0-5 e 60-100 cm, respectivamente (Figura 12). O estoque de C acumulado do SPD variou em média de 17,8 (\pm 3,40) Mg ha⁻¹ na camada de 0-15 cm a 78,3 (\pm 4,68) Mg ha⁻¹ na camada de 0-100 cm. Para CN, essa variação média foi de 18,3 (\pm 1,50) a 91,7 (\pm 5,71) Mg ha⁻¹, para as camadas de 0-15 e 0-100 cm.

Considerando o campo nativo como base, a percentagem de recuperação do estoque de C para o SPD foi de 144, 74, 85, 99, 91 e 71% para as camadas de 0-5, 5-15, 15-30, 30-45, 45-60 e 60-100 cm. Analisando as camadas acumuladas a percentagem de recuperação do estoque de C para o SPD (20 anos) foi de 97, 92, 94, 93 e 85% para as camadas de 0-15, 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm.

Os estoques de C foram significativamente superiores no SPD em relação ao CN nas camadas de 0-5, 5-15, 60-100 e 0-100 cm de profundidade (Figura 12). A recuperação de C foi de 96,9; 91,6; 93,4; 93,4 e 85,4 %, respectivamente, para as camadas de 0-15; 0-30; 0-45; 0-60; 0-100 cm de profundidade (Figura 13).

Além disso, as mudanças do manejo do solo impactaram significativamente nos estoques de C (Figura 13). Por exemplo, o estoque médio de C na camada de 0-30 cm de profundidade diminuiu de 33,1 Mgha⁻¹ em CN para 30,3 Mgha⁻¹ em SPD e de 91,7 Mgha⁻¹ para 78,3 Mgha⁻¹ na camada de 0-100 cm. A partir destes valores e dos valores das demais camadas, pôde-se calcular a taxa de acúmulo anual de carbono decorrente desde a conversão da área para agricultura (somando aproximadamente 17 anos de sistema convencional + 23 anos de SPD), que foi de 0,07; -0,01; - 0,07; - 0,07; - 0,10 e -0,34 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente para as camadas de 0-5, 0-15, 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm de profundidade. Tal resultado indica que o uso do sistema conservacionista recuperou integralmente o estoque de C na superfície do solo em relação ao CN. Isso provavelmente ocorreu porque esses solos apresentam maiores taxas de decomposição da matéria orgânica do solo (MOS), além de serem mais afetados pelas práticas de manejo do solo em comparação aos solos argilosos (BAYER et al. 2011).

Nas demais camadas a taxa de sequestro de C foi inferior ao CN, isso poderia ser explicado devido o histórico da área (Figura 2), que apresenta 17 anos de preparo convencional e 23 anos de SPD com média intensidade de culturas (trigo/soja/aveia + nabo forrageiro/soja) manejado com intensificação da soja (2 cultivos de soja/1 cultivo de milho), além de baixa adição de C de carbono via resíduo (6-8 Mg ha⁻¹ ano⁻¹).

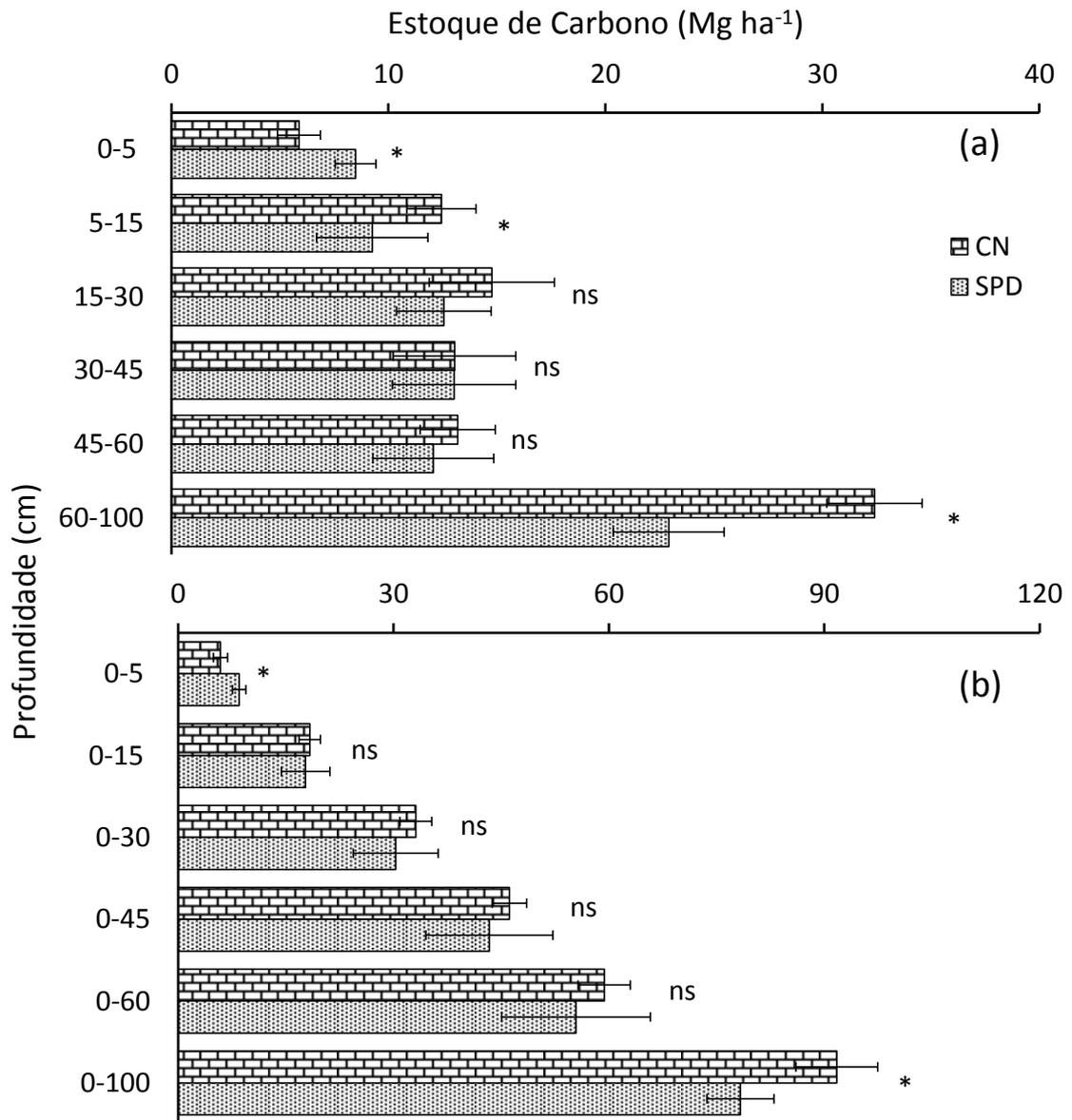


Figura 12 – Estoque de C (Mg ha^{-1}) em Neossolo Quartzarênico sob SPD de longa duração (Manoel Viana – RS) e em campo nativo vizinho. a) Estoque de C estratificado e b) Estoque de C acumulado. CN = Campo Nativo; SPD = Sistema plantio direto.

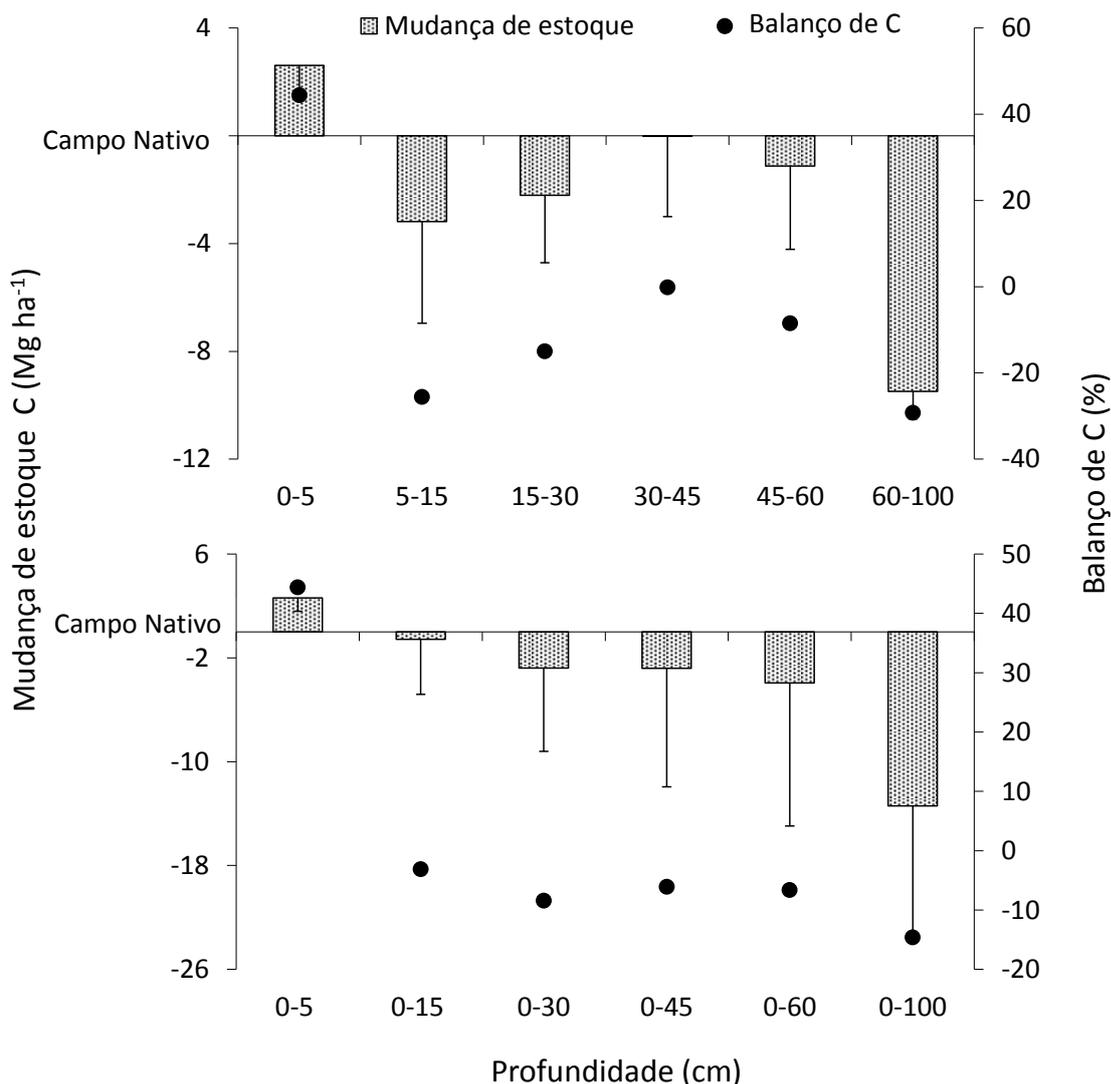


Figura 13 – Mudança de estoque de C (Mg ha⁻¹) e Balanço de C (%) após 20 anos de SPD (trigo/soja/aveia + nabo forrageiro/soja) em em Neossolo Quartzarênico (Manoel Viana – RS). a) camada estratificada e b) camada acumulada. As barras de erro indicam a variação das amostras. Os valores são médias de cinco repetições.

No local 3 (Palmeira das Missões), o estoque de C do SPD (20 anos) variou em média de 14,8 (\pm 3,24) Mg ha⁻¹ na camada de 0-5 cm a 41,2 (\pm 3,70) Mg ha⁻¹ na camada de 60-100 cm. Para CN, essa variação média foi de 12,1 (\pm 1,67) a 49,0 (\pm 0,62) Mg ha⁻¹, para as camadas de 0-5 e 60-100 cm, respectivamente (Figura 14). O estoque de C do SPD (33 anos) variou em média de 15,3 (\pm 2,81) Mg ha⁻¹ na camada de 0-5 cm a 41,8 (\pm 3,25) Mg ha⁻¹ na camada de 60-100 cm. O estoque de C acumulado do SPD (20 anos) variou em média de 33,4 (\pm 1,46) Mg ha⁻¹ na camada de 0-15 cm a 139,5 (\pm 3,70) Mg ha⁻¹ na camada de 0-100 cm. Para CN, essa variação média foi de 34,3 (\pm 1,13) a 164,3 (\pm 1,32) Mg ha⁻¹, para as camadas

de 0-15 e 0-100 cm. O estoque de C acumulado do SPD (20 anos) variou em média de 34,9 (\pm 1,76) Mg ha⁻¹ na camada de 0-15 cm a 143,3 (\pm 1,87) Mg ha⁻¹ na camada de 0-100 cm.

Os estoques de C foram significativamente inferiores em ambos os SPD (20 e 33 anos) em relação ao CN nas camadas 15-30, 30-45, 45-60, 60-100, 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm (Figura 14). Nas camadas de 0-5, 5-15 e 0-15 cm os estoques de C foram iguais estatisticamente em ambos os SPD (20 e 33 anos) em relação ao CN. Embora tenha tido um incremento de 3,8 Mg ha⁻¹ de C na camada 0-100 cm, o SPD (33 anos) foi igual estatisticamente ao estoque de C do SPD (20 anos) para todas as camadas amostradas.

Já nas camadas mais profundas observou-se uma recuperação de C para o SPD (20 anos) de 97,4; 88,8; 86,1; 85,2 e 84,9 %, respectivamente, para as camadas de 0-15; 0-30; 0-45; 0-60 e 0-100 cm de profundidade (Figura 15). E de 91,6; 89,2; 88,0 e 87,3 %, respectivamente, para as camadas de 0-30; 0-45; 0-60 e 0-100 cm de profundidade para o SPD (33 anos) (Figura 15). Essas faixas de recuperação de C estão dentro das faixas calculadas para as áreas experimentais do Rio Grande do Sul.

Considerando o campo nativo como base, a percentagem de recuperação do estoque de C para o SPD (20 anos) foi de 122, 84, 79, 79, 82 e 84% para as camadas de 0-5, 5-15, 15-30, 30-45, 45-60 e 60-100 cm. Enquanto que para o SPD (33 anos) foi de 125, 89, 80, 84, 83 e 85% para as camadas de 0-5, 5-15, 15-30, 30-45, 45-60 e 60-100 cm. Analisando as camadas acumuladas a percentagem de recuperação do estoque de C para o SPD (20 anos) foi de 97, 89, 86, 85 e 85% para as camadas de 0-15, 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm. Enquanto que para o SPD (33 anos) foi de 102, 91, 89, 88 e 87% para as camadas de 0-15, 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm. Esses dados mostram que o estoque de C de ambos os SPD (20 e 33 anos) consolidados foram capazes de recuperar integralmente o estoque de C do CN na camada superficial (0-5 cm) e que o SPD de 33 anos foi além superando o CN até a camada de 0-15 cm. Esse incremento de 2,6 Mg ha⁻¹ de C na camada de 0-5 cm para o SPD de 20 anos é de 3,1 e 0,6 Mg ha⁻¹ de C na camada de 0-5 e 0-15 cm para o SPD de 33 anos poderia ser explicado devido o histórico da área (Figura 4), que apresenta uma intensidade alta de culturas (milho/nabo-forrageiro/trigo/soja/aveia preta) manejado sob SPD, além de elevada adição de C de carbono via resíduo (10-12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹).

Esses dados de recuperação do estoque de C são respaldados por Lopes et al. (2013) recentemente em trabalho de simulação dos estoques de C no município de Vacaria (RS), encontraram que sistemas conservacionistas de preparo do solo, associados à rotação de culturas com alto aporte de biomassa, mostraram-se armazenadores potenciais de estoques de C no solo superiores aos estoques originais de campo nativo. Já Santos (2010) e Sá et al.

(2001, 2008) na região dos Campos Gerais (PR) reportaram que a recuperação do conteúdo de C original depende da qualidade e da quantidade de C adicionado e para tanto, estimaram que necessitasse 22 a 30 anos com o SPD contínuo com um aporte anual médio 7,5 a 8,0 Mg ha⁻¹ de resíduos culturais para recuperar o conteúdo original.

Além disso, as mudanças do manejo do solo impactaram significativamente os estoques de C (Figura 15). Por exemplo, o estoque médio de C na camada de 0-30 cm de profundidade diminuiu de 64,7 Mgha⁻¹ em CN para 57,4 Mgha⁻¹ em SPD (20 anos) e de 164,3 Mgha⁻¹ para 139,5 Mgha⁻¹ na camada de 0-100 cm. E no SPD (33 anos) essa redução foi de 64,7 Mgha⁻¹ em CN para 59,2 Mgha⁻¹ em SPD (20 anos) e de 164,3 Mgha⁻¹ para 143,3 Mgha⁻¹ na camada de 0-100 cm. A partir destes valores, calculou-se a taxa de acúmulo anual de carbono decorrente desde a conversão da área para agricultura (somando aproximadamente 25 anos de sistema convencional + 20 anos de SPD), que foi de 0,05; -0,02; -0,14; -0,25; -0,34 e -0,49 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente para as camadas de 0-5, 0-15, 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm de profundidade para área com 20 anos de SPD. Já a taxa de acúmulo anual de C na área de 33 anos de SPD foi de 0,06; 0,01; - 0,11; - 0,19; - 0,27 e -0,41 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente para as camadas de 0-5, 0-15, 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm de profundidade. Tal fato indica que as taxas de acúmulo de C estão acima do campo nativo nas camadas de 0-5 e 0,15 cm para SPD 20 anos e SPD 33 anos, respectivamente.

O CN apresentou 7,26 (12,6%), 12,8 (16,2%), 17,1 (17,4%) e 24,8 (17,8%) Mg ha⁻¹ C a mais que o SPD (20 anos) para 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm de profundidade, respectivamente. E 5,5 (9,2%), 9,9 (12,0%), 13,8 (13,6%) e 20,9 (14,6%) Mg ha⁻¹ C a mais que o SPD (33 anos) para 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm de profundidade, respectivamente. Provavelmente, essa maior porcentagem de C na camada de 0-100 cm no CN em relação ao SPD está associado ao sistema radicular mais profundo na vegetação natural.

Analisando a porcentagem de armazenamento de C nas camadas profundas do SPD (33 anos) podemos dizer que aproximadamente 76 % do estoque de C se concentrou na camada de 15-100 cm e 59% na camada de 30-100 cm. Dados estes respaldados por Dick et al. (2013b) que encontrou mais de 70 % do C do solo sob clima subtropical armazenado na camada de 20-100 cm de profundidade.

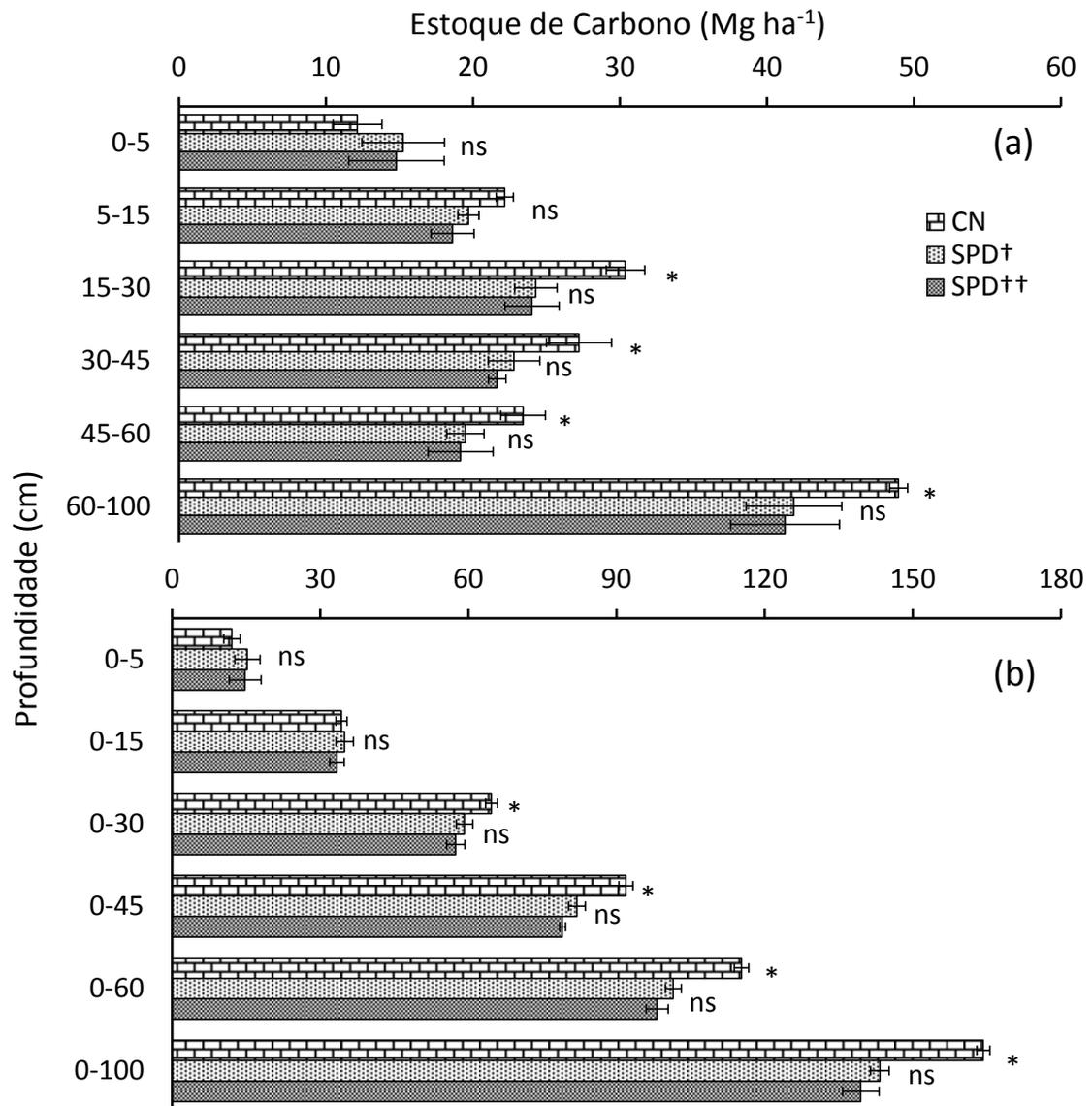


Figura 14 – Estoque de C (Mg ha⁻¹) em Latossolo Vermelho sob SPD de longa duração (Lagoa Vermelha – RS) e em campo nativo vizinho. a) Estoque de C estratificado e b) Estoque de C acumulado. CN = Campo Nativo; † SPD = Sistema plantio direto de 33 anos; SPD†† = Sistema plantio direto 20 anos.

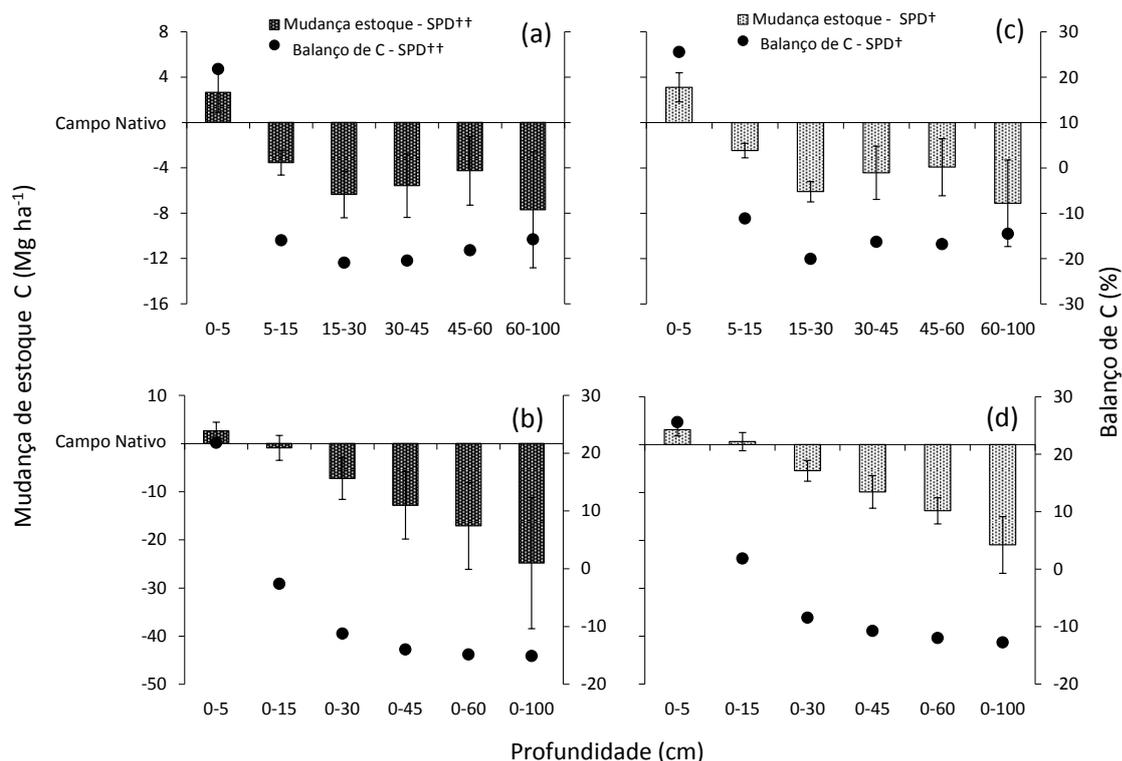


Figura 15 – Mudança de estoque de C (Mg ha⁻¹) e Balanço de C (%) após 20 e 33 anos de SPD (milho/nabo-forrageiro/trigo/soja/aveia preta) em Latossolo Vermelho argiloso (Palmeira das Missões – RS). (a) e (c) camada estratificada. (b) e (d) camada acumulada. As barras de erro indicam a variação das amostras. Os valores são médias de cinco repetições. †SPD = Sistema plantio direto de 33 anos; SPD†† = Sistema plantio direto 20 anos.

No local 4 (Lagoa Vermelha), o estoque de C do SPD variou em média de 19,9 (\pm 2,28) Mg ha⁻¹ na camada de 0-5 cm a 66,2 (\pm 1,10) Mg ha⁻¹ na camada de 60-100 cm. Para CN, essa variação média foi de 19,9 (\pm 3,22) a 42,7 (\pm 1,79) Mg ha⁻¹, para as camadas de 0-5 e 60-100 cm, respectivamente (Figura 16). O estoque de C acumulado do SPD variou em média de 49,2 (\pm 6,57) Mg ha⁻¹ na camada de 0-15 cm a 225,4 (\pm 18,21) Mg ha⁻¹ na camada de 0-100 cm. Para CN, essa variação média foi de 54,6 (\pm 10,48) a 193,4 (\pm 9,18) Mg ha⁻¹, para as camadas de 0-15 e 0-100 cm.

Nas camadas de 0-5, 15-30, 0-30 e 0,45 cm de profundidade os estoques de C foram iguais estatisticamente no SPD e CN (Figura 16). Já os estoques de C foram significativamente superiores no SPD em relação ao CN nas camadas de 30-45, 45-60, 60-100, 0-60 e 0-100 cm de profundidade (Figura 16). O estoque de C do CN foi superior ao estoque de C do SPD somente para as camadas de 5-15 e 0-15 cm.

Estes dados representam uma recuperação de C de 90,1 e 93,6 % para as camadas de 0-15 e 0-30 cm de profundidade (Figura 17). Dados semelhantes aos calculados para o

Latossolo Bruno Alumínio típico sob experimento de longa duração (30 anos) foram apresentados pela FAPA (Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária) em Guarapuava-PR (REIS, 2012) que obteve uma recuperação de 94,8% (Tabela 4). No experimento de longa duração (29 anos) o IAPAR-Ponta Grossa (SÁ et al., 2014) obteve 94,4% para a camada de 0-40 cm e no Latossolo do experimento da Embrapa-Trigo em Passo Fundo-RS (BODDEY et al., 2010) apresentou uma recuperação de 97,7% (Tabela 4). Os três solos citados anteriormente tiveram acúmulo de C em profundidade como a exemplo do presente estudo.

O presente estudo apresentou incremento de 7,6; 7,2 e 23,5 Mg ha⁻¹ de C nas camadas de 30-45, 45-60 e 60-100 cm após 25 anos de SPD. Nas camadas acumuladas esse incremento foi de 1,4; 8,5 e 32,0 Mg ha⁻¹ de C nas camadas de 0-45, 0-60 e 0-100 cm de profundidade. Porém a perda de estoque de C nas camadas acima de 30 cm não explicou esse acúmulo de carbono em profundidade, uma vez que a perda total de 0-30 foi de 6,3 Mg ha⁻¹ e o ganho de 30-100 cm foi de 38,2 Mg ha⁻¹.

O que pode explicar esse maior acúmulo de C observado na camada de 30-100 cm é que além da percolação de MOS (matéria orgânica do solo) ao longo do perfil do solo, o transporte da mesma pode ter sido realizado por bioturbação (TONNEIJCK e JONGMANS, 2008; POWLSON et al. 2011; RUMPEL & KÖGEL-KNABNER, 2011) que é favorecido pela manutenção da estrutura do solo sob SPD. Outro fato é a contribuição da fauna para o acúmulo de C em profundidade pela presença de bioporos, os quais podem conter também matéria orgânica dissolvida e carcaças de organismos constituintes da fauna do solo. Além dos fatores acima mencionados, o incremento do estoque de C do solo em sistemas conservacionistas se deve também a modificações nos sistemas de culturas, que induzem ao aumento no aporte de C (BONO et al., 2008; CAMPOS et al., 2011), e por manter/incrementar a atuação dos mecanismos de proteção do C recentemente adicionado ao solo (STEWART et al., 2007).

Durante a condução deste trabalho observou-se a estratégia do produtor Arnaldo Trein (proprietário da área amostrada em Lagoa Vermelha), que utilizou uma alta intensidade de culturas (soja/nabo-forrageiro+aveia-preta/milho/trigo) aumentando o aprofundamento do sistema radicular da soja em sua lavoura de SPD e ainda quando a soja encontrava-se em fase de queda de folhas, o nabo forrageiro era sobresemeado, neste caso com aviação agrícola, de maneira que quando a soja completava o seu ciclo (colheita), o nabo já se encontrava estabelecido. Posteriormente, a próxima cultura da soja encontrou bioporos das anteriores raízes do nabo apresentando um desenvolvimento radicular satisfatório. Neste caso, além dos bioporos representarem um caminho preferencial ao desenvolvimento das raízes de soja,

deve-se considerar também que os exsudatos das raízes de nabo criaram condições químicas do solo favoráveis ao crescimento das raízes da leguminosa (AMADO et al., 2007). Os bioporos formados pelas raízes do nabo têm alta estabilidade e, após a sua decomposição, atuam como canais preferenciais para a infiltração da água no solo (WILLIANS & WEIL, 2004). Nicoloso et al., (2008) detectaram que o uso do nabo-forrageiro foi eficiente em aumentar a macroporosidade do solo, diminuir a resistência do solo à penetração e melhorar a infiltração de água no solo. Os resultados experimentais disponíveis evidenciam a importância da utilização de espécies com sistema radicular bem desenvolvido, visando o incremento de C em profundidade. Wright et al. (2007) e Boddey et al. (2010), sugeriram que a translocação de compostos de C solúvel pode ser um importante mecanismo de redistribuição do C no perfil do solo, oriundo da adição superficial de resíduos vegetais em sistemas conservacionistas.

Considerando o campo nativo como base, a porcentagem de recuperação do estoque de C para o SPD foi de 100, 84, 98, 125, 129 e 155 % para as camadas de 0-5, 5-15, 15-30, 30-45, 45-60 e 60-100 cm. Analisando as camadas acumuladas a porcentagem de recuperação do estoque de C para o SPD (20 anos) foi de 90, 93, 101, 106 e 116 % para as camadas de 0-15, 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm.

Além disso, as mudanças do manejo do solo impactaram significativamente os estoques de C (Figura 17). Por exemplo, o estoque médio de C na camada de 0-15 cm de profundidade diminuiu de 54,6 Mgha⁻¹ em CN para 49,2 Mgha⁻¹ em SPD e de 96,2 Mgha⁻¹ para 90,0 Mgha⁻¹ na camada de 0-30 cm. A partir destes valores, pôde-se calcular a taxa de acúmulo anual de C decorrente desde a conversão da área para agricultura (somando aproximadamente 20 anos de sistema convencional, 2 anos de preparo reduzido e 25 anos de SPD) (Figura 5), que foi de 0,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para a camada de 0-5 cm, ou seja atingiu o equilíbrio dinâmico nessa camada. Na camada de 0-100 cm essa taxa foi de 0,71 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Enquanto que somente a subsuperfície (60-100 cm) armazenou 73,4 % (0,52 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) desse C. Esses dados são ratificados por Jobbagy e Jackson (2000) que afirmaram que a subsuperfície tem potencial para estocar o equivalente a 60% do total do C do perfil do solo. Nessas camadas o acúmulo de C pode ser resultado de percolação da matéria orgânica dissolvida dos horizontes superficiais, e também do aporte de C do sistema radicular (SANDERMAN et al., 2008).

Tal fato indica que o efeito do sistema conservacionista sobre o acúmulo de C ocorre também na subsuperfície do solo, que se caracteriza por representar um grande reservatório de C quando comparado a camada superficial (0-20 cm). Esses resultados são respaldados pelos obtidos por Boddey et al (2010) onde constataram que o estoque de 0-100 cm foi de 59%

superior ao estimado até 0-30 cm de profundidade. Reis (2012) em experimento de longa duração em Guarapuava também encontrou elevada taxa de acúmulo de C ($1,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) em profundidade (0-100 cm) que representou 69 % do acúmulo de C estão em profundidade.

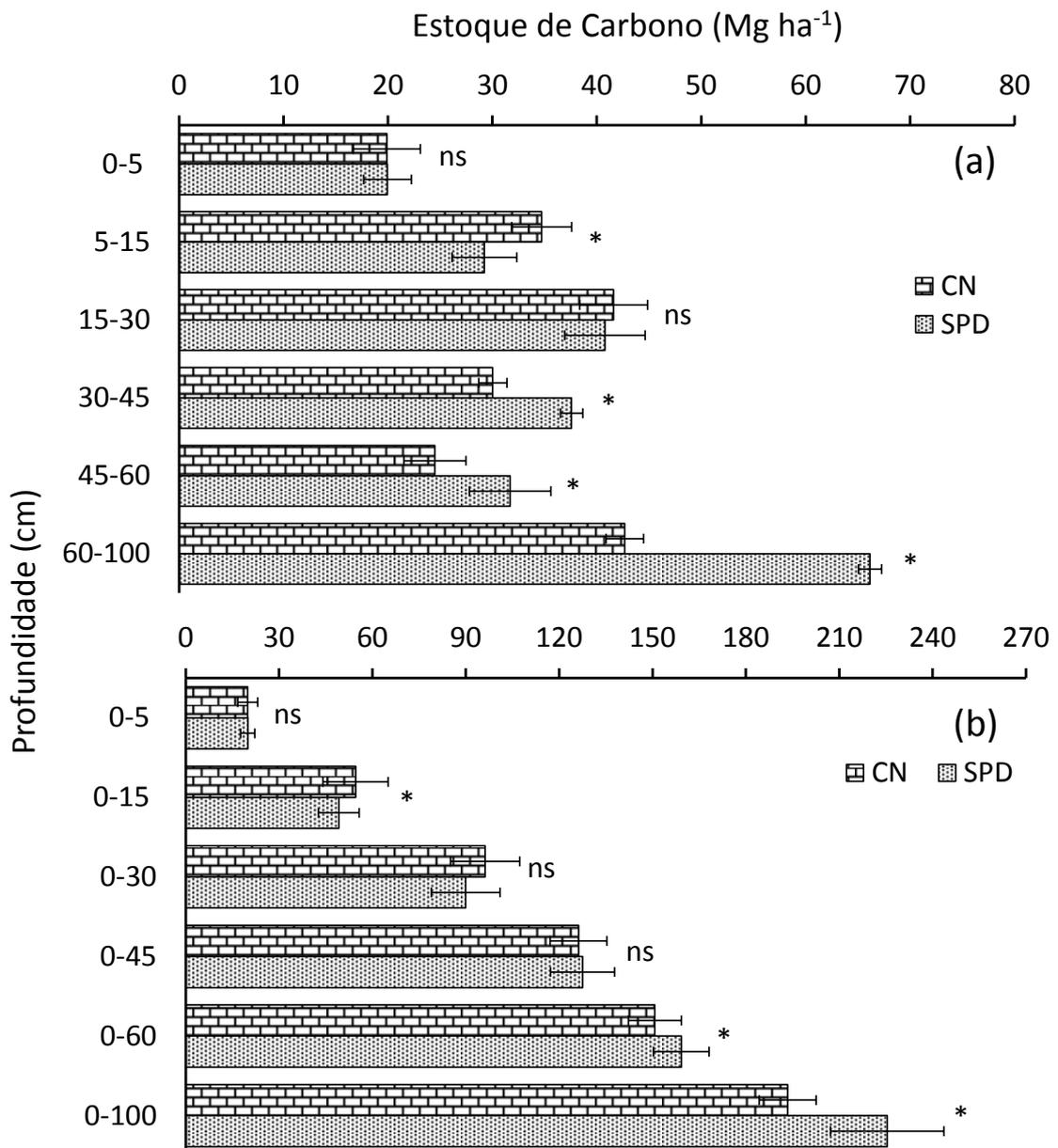


Figura 16 – Estoque de C (Mg ha^{-1}) em Latossolo Vermelho argiloso sob SPD de longa duração (Lagoa Vermelha – RS) e em campo nativo vizinho. a) Estoque de C estratificado e b) Estoque de C acumulado. CN = Campo Nativo; SPD = Sistema plantio direto.

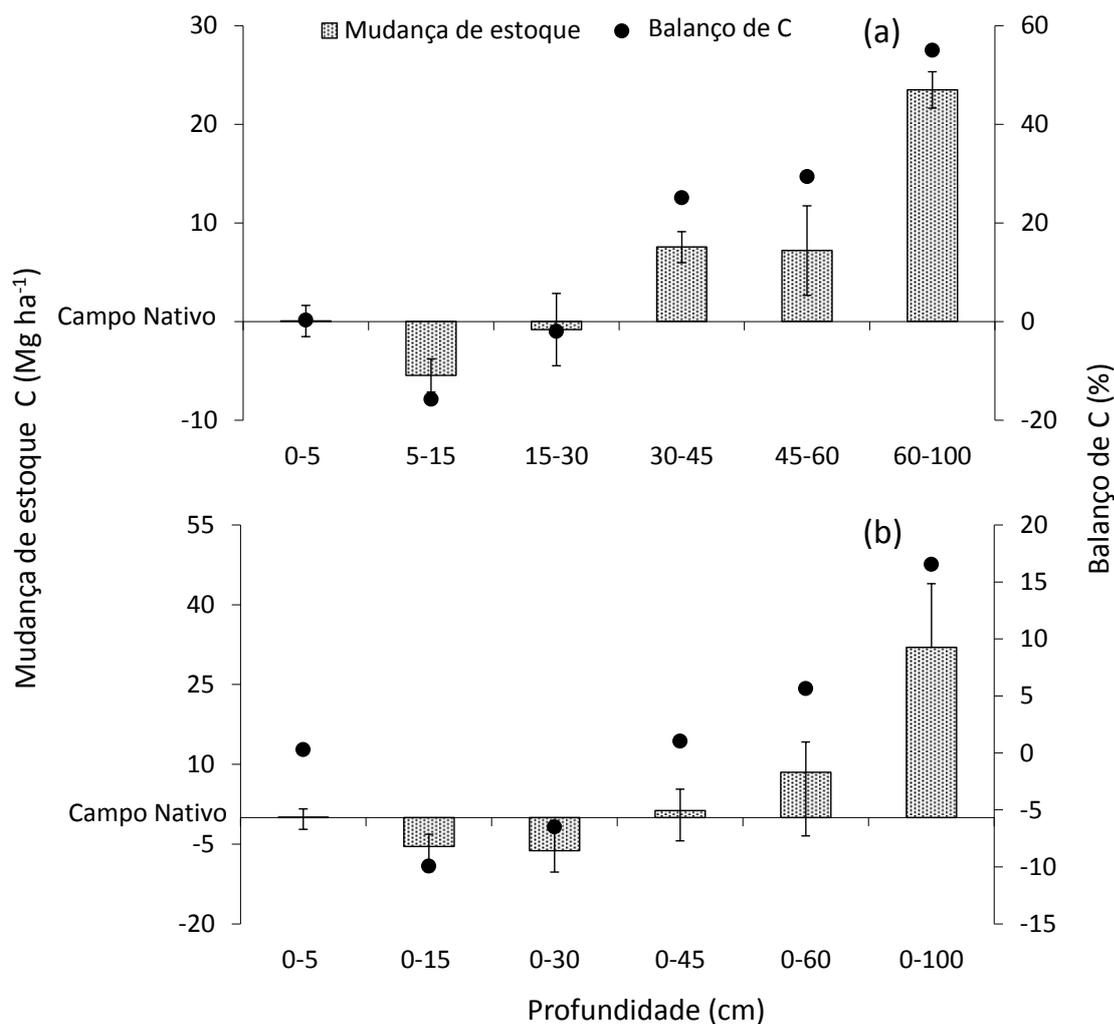


Figura 17 – Mudança de estoque de C (Mg ha⁻¹) e Balanço de C (%) após 20 anos de SPD (soja/nabo-forrageiro+aveia/milho/trigo) em Latossolo Vermelho argiloso (Lagoa Vermelha – RS). a) camada estratificada e b) camada acumulada. As barras de erro indicam a variação das amostras. Os valores são médias de cinco repetições.

No local 5 (Cruz Alta), o estoque de C do SPD variou em média de 19,5 (\pm 1,31) Mg ha⁻¹ na camada de 0-5 cm a 45,9 (\pm 3,57) Mg ha⁻¹ na camada de 60-100 cm. Para CN, essa variação média foi de 16,6 a 39,2 Mg ha⁻¹, para as camadas de 0-5 e 60-100 cm, respectivamente (Figura 18). O estoque de C acumulado do SPD variou em média de 42,3 (\pm 1,68) Mg ha⁻¹ na camada de 0-15 cm a 165,0 (\pm 7,76) Mg ha⁻¹ na camada de 0-100 cm. Para CN, essa variação média foi de 42,9 a 167,3 Mg ha⁻¹, para as camadas de 0-15 e 0-100 cm.

Considerando o campo nativo como base, a porcentagem de recuperação do estoque de C para o SPD foi de 117, 92, 97, 96, 98 e 104 % para as camadas de 0-5, 5-15, 15-30, 30-45, 45-60 e 60-100 cm. Analisando as camadas acumuladas a porcentagem de recuperação do

estoque de C para o SPD (20 anos) foi de 98, 96, 93, 93 e 98 % para as camadas de 0-15, 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm.

Nas camadas de 0-15, 0,30 e 0-100 cm de profundidade os estoques de C foram iguais estatisticamente no SPD e CN (Figura 18). Já os estoques de C foram significativamente superiores no SPD em relação ao CN nas camadas de 0-5 e 60-100 cm de profundidade (Figura 18). O estoque de C do CN foi superior ao estoque de C do SPD para as camadas de 5-15, 15-30, 30-45, 45-6, 0-45 e 0-60 cm. Estes dados representaram uma recuperação de C de 96,6; 97,5; 95,9 e 98,1% para as camadas de 5-15, 15-30, 30-45 e 45-60 cm de profundidade (Figura 19). Já para as camadas acumuladas a recuperação foi de 96,0; 93,2; 93,0 e 98,6 % para as camadas de 0-30, 0-40, 0-60 e 0-100 cm de profundidade. Dados estes muito próximos dos óbitos na área experimental de Cruz Alta (Tabela) que para as camadas de 0-30 e 0-60 cm apresentou 103,8 e 85,8 % de recuperação.

Houve incremento de 2,8 e 6,6 Mg ha⁻¹ de C nas camadas de 0-5 e 60-100 cm após 25 anos de SPD. Isso poderia ser explicado devido o histórico da área (Figura 6), que apresenta uma intensidade alta de culturas (Aveia + ervilhaca/soja/milho/ nabo forrageiro/trigo) manejado sob SPD, além de elevada adição de C de carbono via resíduo (10-12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹). Porém a perda de estoque de C nas camadas de 5-15, 15-30, 30-45 e 45-60 cm pode explicar esse acúmulo de carbono em profundidade (60-100 cm), uma vez que a perda total dessas camadas somou 11,8 Mg ha⁻¹ e o ganho de 60-100 cm foi de apenas 6,6 Mg ha⁻¹. Esse carbono pode ter sido translocado por fluxo preferencial até essa camada profunda (RUMPEL et al. 2009; CHABBI et al., 2009).

Além disso, as mudanças do manejo do solo impactaram significativamente os estoques de C (Figura 19). Por exemplo, o estoque médio de C na camada de 5-15 cm de profundidade diminuiu de 26,2 Mgha⁻¹ em CN para 22,8 Mgha⁻¹ em SPD e de 28,8 Mgha⁻¹ para 24,7 Mgha⁻¹ na camada de 30-45 cm. A partir destes dados valores, pôde-se calcular a taxa de acúmulo anual de C decorrente desde a conversão da área para agricultura (somando aproximadamente 20 anos de sistema convencional, 4 anos de preparo reduzido e 25 anos de SPD) (Figura 6), que foi de 0,06 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para a camada de 0-5 cm, ou seja recuperou o equilíbrio dinâmico nessa camada. Na camada de 0-100 cm essa taxa foi de - 0,05 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

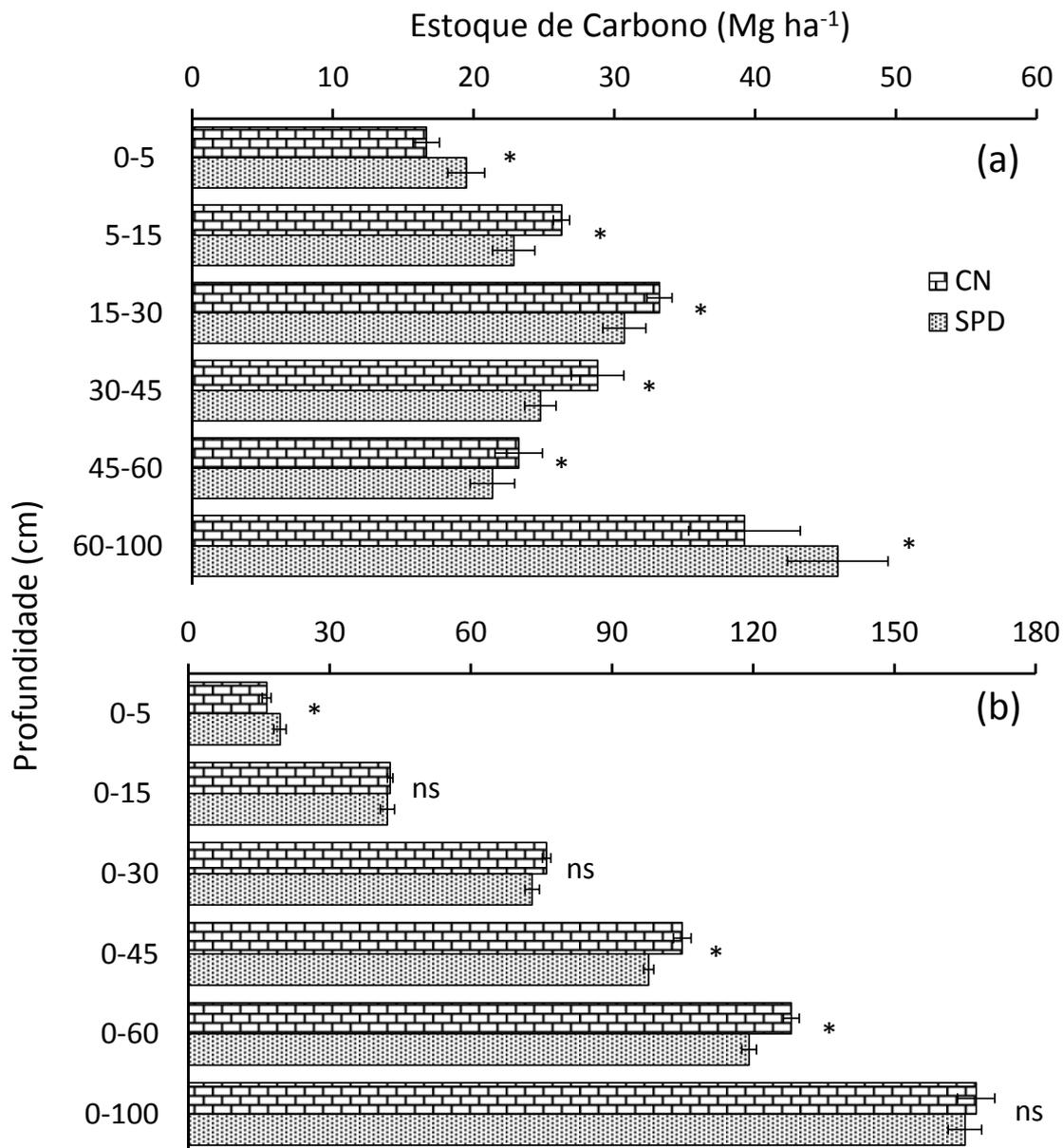


Figura 18 – Estoque de C (Mg ha^{-1}) em Latossolo Vermelho argiloso sob SPD de longa duração (Cruz Alta – RS) e em campo nativo vizinho. a) Estoque de C estratificado e b) Estoque de C acumulado. CN = Campo Nativo; SPD = Sistema plantio direto.

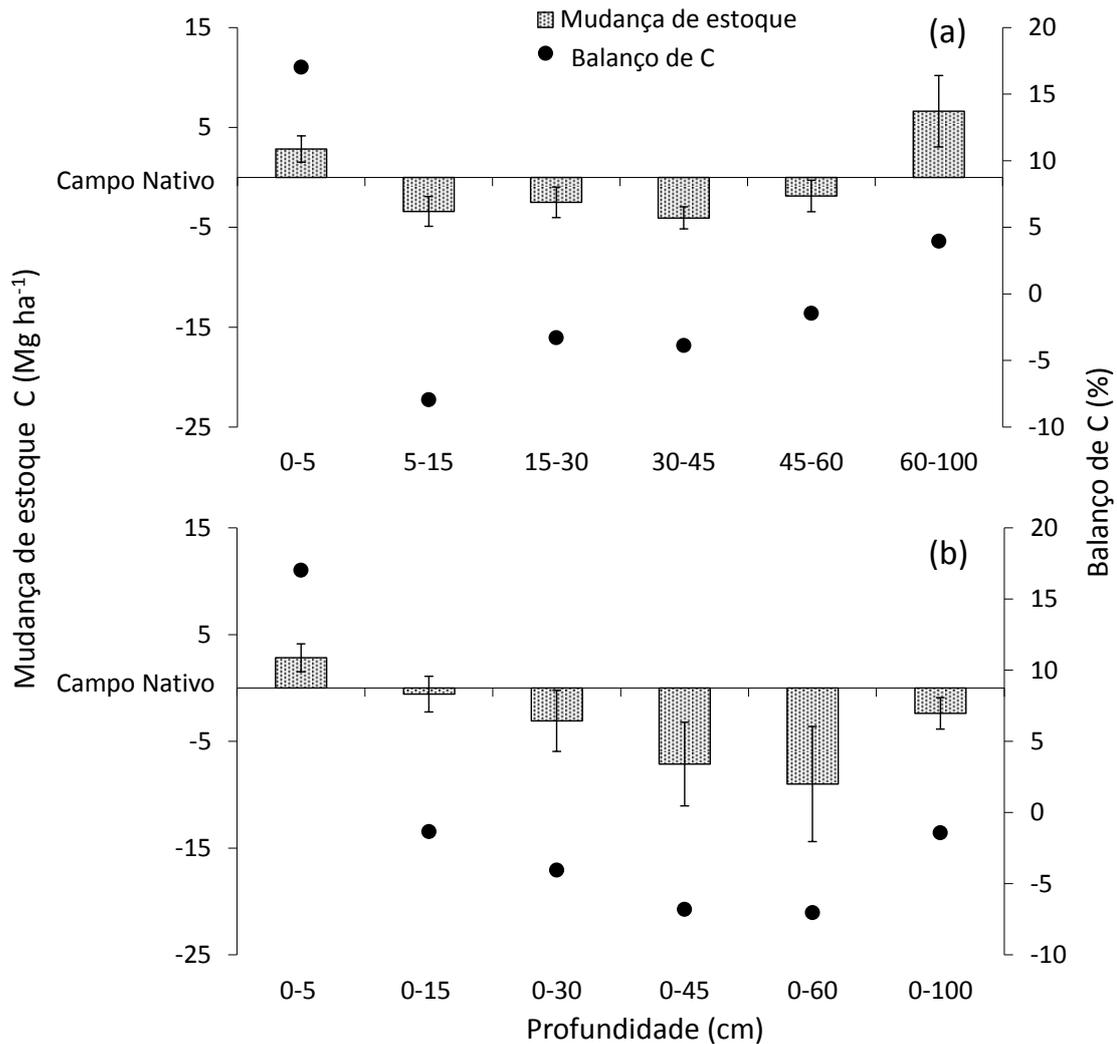


Figura 19 – Mudança de estoque de C (Mg ha⁻¹) e Balanço de C (%) após 25 anos de SPD (Aveia + ervilhaca/soja/milho/ nabo forrageiro/trigo) em Latossolo Vermelho argiloso (Cruz Alta – RS). a) camada estratificada e b) camada acumulada. As barras de erro indicam a variação das amostras. Os valores são médias de cinco repetições.

No local 6 (Fortaleza dos Valos), o estoque de C do SPD variou em média de 14,7 (\pm 1,58) Mg ha⁻¹ na camada de 0-5 cm a 39,6 (\pm 1,32) Mg ha⁻¹ na camada de 60-100 cm. Para CN, essa variação média foi de 16,6 a 39,2 Mg ha⁻¹, para as camadas de 0-5 e 60-100 cm, respectivamente (Figura 20). O estoque de C acumulado do SPD variou em média de 33,4 (\pm 3,93) Mg ha⁻¹ na camada de 0-15 cm a 133,0 (\pm 10,8) Mg ha⁻¹ na camada de 0-100 cm. Para CN, essa variação média foi de 42,9 a 167,3 Mg ha⁻¹, para as camadas de 0-15 e 0-100 cm.

Considerando o campo nativo como base, a percentagem de recuperação do estoque de C para o SPD foi de 88, 71, 67, 69, 77 e 99 % para as camadas de 0-5, 5-15, 15-30, 30-45, 45-60 e 60-100 cm. Analisando as camadas acumuladas a percentagem de recuperação do

estoque de C para o SPD (20 anos) foi de 78, 73, 72, 73 e 79 % para as camadas de 0-15, 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm.

Nas camadas de 0-5 e 60-100 cm de profundidade os estoques de C foram iguais estatisticamente no SPD e CN (Figura 20). O estoque de C do CN foi superior ao estoque de C do SPD para as camadas de 5-15, 15-30, 30-45, 45-60, 0-15, 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm. Estes dados representaram uma recuperação de C de 88,5; 77,9; 73,4; 72,1; 73,0 e 79,5 % para as camadas de 0-5, 0-15, 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm de profundidade (Figura 21).

Além disso, as mudanças do manejo do solo impactaram significativamente os estoques de C (Figura 21). Por exemplo, o estoque médio de C na camada de 0-15 cm de profundidade diminuiu de 42,9 Mg ha^{-1} em CN para 33,4 Mg ha^{-1} em SPD e de 76,1 Mg ha^{-1} para 55,9 Mg ha^{-1} na camada de 0-30 cm. A partir destes valores, pôde-se calcular a taxa de acúmulo anual de carbono decorrente desde a conversão da área para agricultura (somando aproximadamente 17 anos de sistema convencional, 3 anos de preparo reduzido e 25 anos de SPD), que foi de -0,04; -0,21; - 0,45; - 0,65; - 0,77 e -0,76 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente para as camadas de 0-5, 0-15, 0-30, 0-45, 0-60 e 0-100 cm de profundidade. Tal fato indica que as taxas de acúmulo de C estão todas abaixo do campo nativo, embora a camada superficial (0-5 cm) esteja próxima do equilíbrio dinâmico.

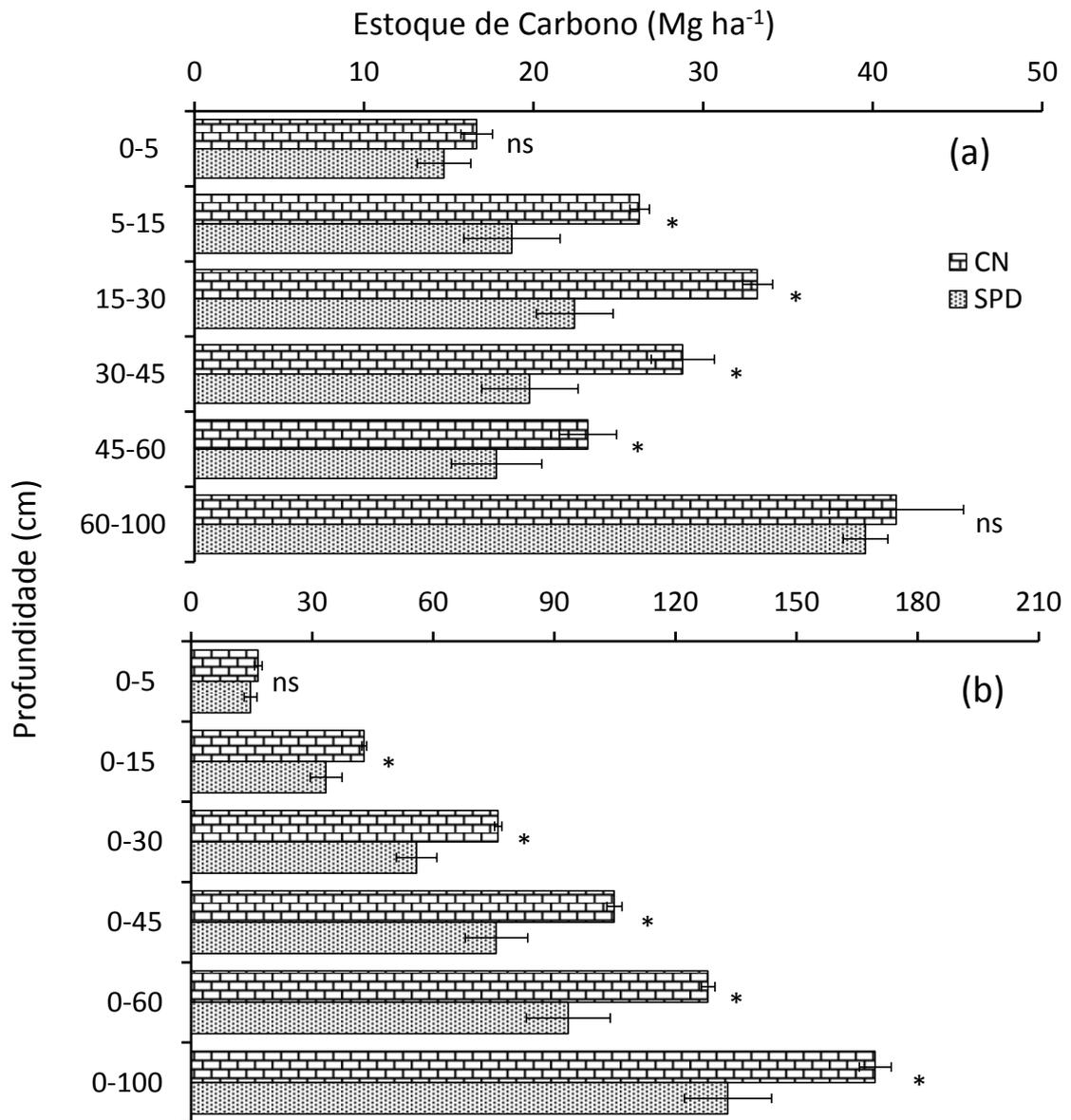


Figura 20 – Estoque de C (Mg ha^{-1}) em Latossolo Vermelho argiloso sob SPD de longa duração (Fortaleza dos Valos – RS) e em campo nativo vizinho. a) Estoque de C estratificado e b) Estoque de C acumulado. CN = Campo Nativo; SPD = Sistema plantio direto.

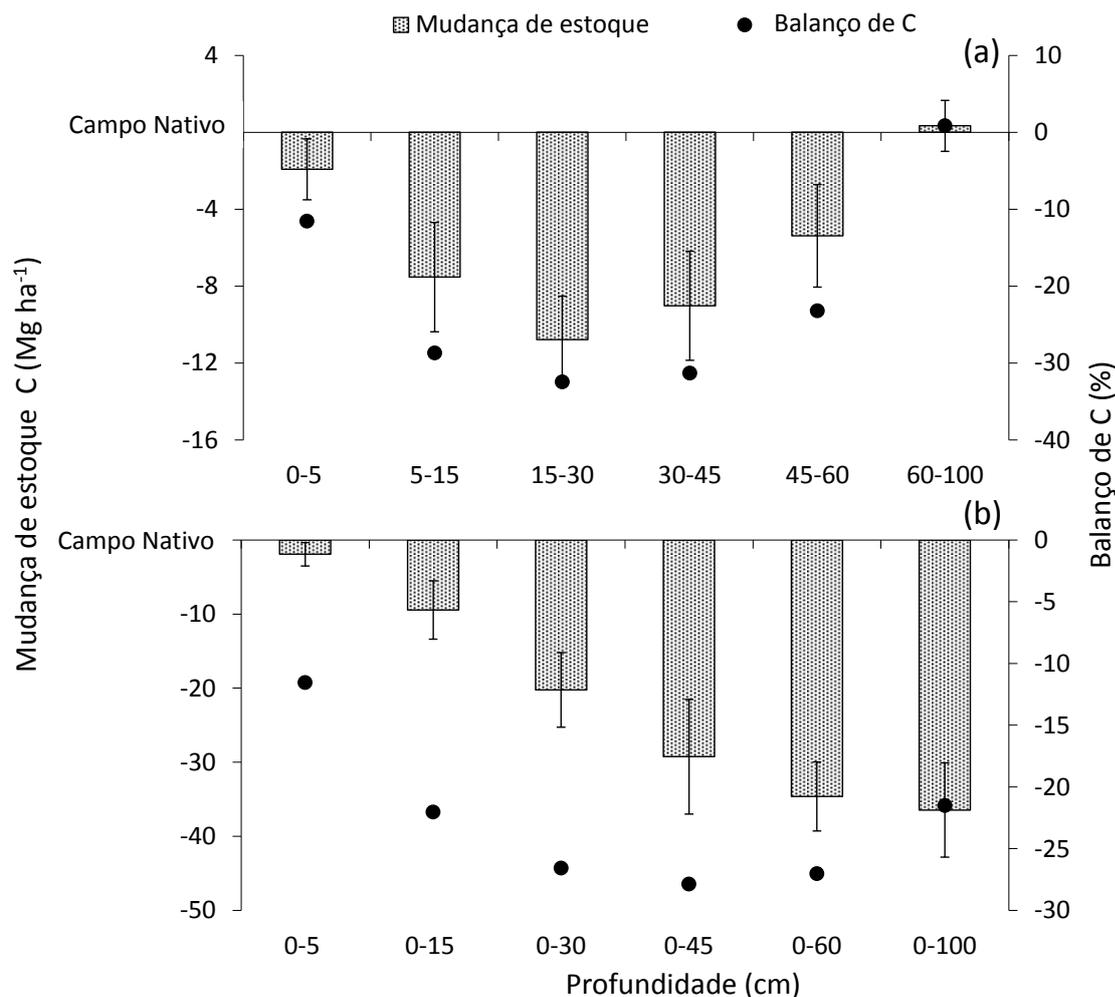


Figura 21 – Mudança de estoque de C (Mg ha^{-1}) e Balanço de C (%) após 25 anos de SPD (trigo/soja/aveia-preta + nabo forrageiro/milho/nabo forrageiro) em Latossolo Vermelho argiloso (Fortaleza dos Valos – RS). a) camada estratificada e b) camada acumulada. As barras de erro indicam a variação das amostras. Os valores são médias de cinco repetições.

No geral os maiores estoques de C encontrados foram os do Latossolo do Local 4 (Lagoa Vermelha - RS) e do local 5 (Cruz Alta) apresentando 225 e 165 Mg ha^{-1} , respectivamente para a camada de 0-100 cm. Esse fato pode estar relacionado com diferenças das condições climáticas em relação aos outros locais (Santa Rosa, Manoel Viana, Palmeira das Missões e Fortaleza do Valos). Enquanto a temperatura média anual de Lagoa Vermelha ($16,8 \text{ }^\circ\text{C}$) e Cruz Alta ($17,2 \text{ }^\circ\text{C}$) são menores em relação aos outros locais ($19,3$ a $20,8 \text{ }^\circ\text{C}$) e a precipitação média anual de Lagoa Vermelha (1735 mm) e Cruz Alta (1729 mm) são ligeiramente superiores as precipitações dos demais locais (1625 a 1727 mm). Dessa maneira, a taxa de decomposição da MOS é menor na região em Lagoa Vermelha e Cruz Alta em relação aos demais locais. A influência do clima sobre o estoque de C também foi verificada

por Jobbágy e Jackson (2000), os quais relataram que maiores precipitações e menores temperaturas estimulam o acúmulo de C no solo.

A recuperação do estoque de C superficial (0-5 cm) em relação ao CN foi de 144% para o Neossolo Quartzarênico (Manoel Viana) e variando de 100 a 122 % para os Latossolos argilosos (Palmeira das Missões, Lagoa Vermelha, Cruz Alta). Esse efeito na recuperação superficial mais intensa no Neossolo Quartzarênico em relação aos Latossolos se explica porque em solos argilosos e com predomínio de minerais de carga variável, apresentam menores taxas de decomposição da MOS, além disto são menos afetados pelos sistemas de preparo do solo em comparação aos solos arenosos (BAYER et al., 2011).

Tabela 4 – Balanço de C (PC x SPD x CN) em experimentos de longa duração no sul do Brasil.

Local	Coordenadas geográficas	Solo	Argila	SPD	Rotação de cultivos	Profundidade	Estoque de C (Mg ha ⁻¹)			Perda† do PC (%)	Ganho de estoque de C do SPD †† (%)	Recuperação de C ††† (%)	Taxa Seq. (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Referência
							Vegetação nativa	SPD	PC					
Santo Ângelo	28°30'S e 54°27'W	Latossolo Vermelho distroférrico	711	30	Trigo/soja/milho/aveia/nabo forrageiro	0-20	65,9	42,3	39,5	40,1	6,6	64,2	0,09	Reis (2012)
						0-30	87,3	60,5	57,3	34,4	5,3	69,3	0,11	
						0-100	179,2	145,6	134,9	24,7	7,3	81,3	0,36	
Fundacep - Cruz Alta	28°33'S e 53°40'W	Latossolo Vermelho distrófico	570	25	trigo/soja/aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo	0-15	42,9‡	38,8	35,1	18,2	9,5	90,4	0,15	Nicoloso (2009)
						0-30	76,1‡	73,20	64,7	15,0	11,61	96,2	0,34	
						0-90	167,3‡	143,5	132,1	21,1	7,9	85,8	0,46	
Embrapa Trigo-Passo Fundo	28°15'S e 52°24'W	Latossolo Vermelho distrófico típico	630	15	aveia branca/soja-cevada/soja-ervilhaca peluda/milho	0-20								Boddey et al. (2010)
						0-30		58,8	55,0		6,5		0,25	
						0-100	171,1	167,1	150,4	12,1	10,0	97,7	1,11	
Santa Maria – UFSM	29° 43'S e 53° 42'W	Argissolo Vermelho distrófico arênico	87	17	Milho + Feijão de porco/soja	0-15	17,6	18,3	12,7	27,8	30,6			Nicoloso (2007)
						0-30		33,1	22,0		33,5		0,65	
					Milho + Mucuna preta / soja	0-15	17,6	19,0	12,7	27,8	33,1		0,37	
						0-30		33,4	22,0		34,1		0,67	
Eldorado do Sul - UFRGS	30° 51'S e 51°38'W	Argissolo Vermelho distrófico arênico	240	19	Aveia preta+Vica/Milho+Caupi	0-17,5 cm	44,8 ††	36,7	29,9 †††	33,2	18,5	81,9	0,36	Vieira (2007)
						0-30	67,2 ††	58,1	51,6 †††	13,5	11,2	86,5	0,34	
					Guandu + Milho	0-17,5 cm	44,8 ††	39,6	29,9 †††	33,2	24,5	88,4	0,51	
						0-30	67,2 ††	60,5	51,6 †††	23,2	14,7	90,0	0,47	

EPAGRI – Campos Novos	27°24' S, 51°13' W	Nitossolo Vermelho distrófico	760	7	triticale(centeio)/soja/vica/milho/aveia/feijão/trigo mourisco (nabo forrageiro)	0-20	57,2	53,4	50,4	11,9	5,6	93,4	0,43	Amado et al. (2006)
FAPA-Guarapuava	25°33'S e 51°29'W	Latossolo Bruno Alumínio típico	61,4	30	Aveia brana/ trigo/cevada/ ervilhaca peluda/ nabo forrageiro/soja/milho	0-20	81,2	74,8	63,7	21,55	14,8	92,1	0,37	Reis (2012)
						0-30	108,9	103,2	92,8	14,8	10,1	94,8	0,32	
						0-100	241,9	234,2	195,3	19,0	16,6	96,8	1,30	
Fundação ABC	25°00'S e 50°09'W	Latossolo Vermelho	450	16	2 safras por ano com soja e milho no verão alternando com culturas de inverno	0-20	94,9	81,2	67,8	28,5	16,5	85,6	0,84	Sá et al. (2014)
Iapar - Ponta Grossa	25°09'S e 50°09'W	Latossolo Vermelho Distroférrico típico	619	29	Soja/aveia preta/milho/aveia preta/soja/trigo	0-40	159,3	137,0	111,2	30,2	18,8	86,0	1,61	Sá et al. (2013)
						0-20	92,0	84,4	67,4	26,7	20,1	91,7	0,59	
						0-40	145,7	137,6	120,3	17,4	12,6	94,4	0,60	
						0-100	257,9	266,5	249,5	3,2	6,4		0,59	
Fundação ABC	25°00'S e 50°09'W	Latossolo Vermelho	450	21	Azevém-Milho-Azevém-Soja	0-20	94,9 ^g	61,1	58,7			64,4	0,11 ^{‡‡‡}	Albuquerque (2012)
						0-100		177,9	172,1				0,28 ^{‡‡‡}	
					Alfafa (<i>Medicago sativa</i> L.)-Milho	0-20	94,9 ^g	63,5	58,7			66,9	0,23 ^{‡‡‡}	Albuquerque (2012)
						0-100		182,6	172,1				0,50 ^{‡‡}	

† Perda (%) em relação a vegetação nativa; ‡ Dados de Jantalia (2005); †† Ganho (%) em relação ao preparo convencional; ††† Recuperação de C= a quantidade de estoque de C (%) recuperada com uso do SPD de longa duração em relação ao estoque de C da vegetação nativa; ‡‡ Dados obtidos de Lovato et al. (2004); ‡‡‡ Taxa de sequestro de C em relação a trigo/soja; ^g Dados de Sá et al. (2014); ^{g^g} Tempo de adoção (anos) para que o estoque de C do SPD iguale o estoque de C da vegetação nativa. ^{g^{g^g}} Estoque de C do preparo convencional (Aveia/Milho) com 139 kg ha⁻¹ N mineral (Lovato et al. (2004).

2.5.4 Cenário geral de perda e ganho de estoque de C em função do sistema de manejo

Conforme observado na figura 22, à exploração agrícola com o uso de sistema de preparo convencional por 25 anos (em média) ocasionou uma queda (aproximadamente 23 %) acentuada nos estoques de C ao longo dos anos, e isto ocorreu devido, principalmente, ao rompimento do estado estável do solo (LOPES, 2013). Esta queda nos estoques de C é explicada pelo fato das taxas de perdas de C superarem as taxas de adição de resíduos ao solo pela adoção de sistemas sem rotação de culturas (Bayer, 1996). Além disto, entre o período de 1970 e 1980 houve a prática de queima da palha do trigo, que teve efeito na redução da adição de resíduos culturais ao solo (LOPES, 2013).

A queda inicial, proporcionada pela adoção de um sistema de preparo convencional e/ou reduzido associado a menor adição de biomassa pelas culturas foi também verificada em outras regiões simuladas pelo Century no Rio Grande do Sul (TORNQUIST et al. 2009; BORTOLON, 2008; LOPES et al., 2013). Entretanto, a recuperação dos estoques de C com adoção de práticas conservacionistas e a introdução de culturas com maior potencial de produção de biomassa nos locais 2, 3 e 6 (Figura 22) não é tão alta quanto à recuperação verificada em Lagoa Vermelha - RS (116,5 %), onde o solo é mais favorável à manutenção e a recuperação dos estoques de C por meio da proteção química e física da matéria orgânica e da menor ação dos microrganismos devido ao clima mais frio (Tabela 1). Este sistema com alta adição de resíduos e não revolvimento do solo ao longo do tempo tende a uma estabilização e recuperação do estoque de C. Sendo que no caso de Lagoa Vermelha, por possuir solos naturalmente bastante ácidos e com baixos teores de fósforo, esta estabilização, sob sistemas agrícolas com histórico de calagem e adubação, tende a valores acima dos verificados em situação de campo nativo. Situação semelhante já foi verificada a campo por outros autores (SÁ et al. 2001; DIECKOW et al. 2005, TIVET et al. 2013; LOPES et al., 2013) em diferentes tipos de solos, onde se verificou um aumento nos estoques de C superior ao estoque de vegetação nativa por meio da adoção de lavouras sob plantio direto por diversos anos.

Por outro lado, o local de Santa Rosa (RS), que conforme o histórico da área (Figura 1), apresenta uma intensidade baixa de culturas (soja/trigo/soja/aveia-preta) manejado sob SPD com intensificação da soja (3 cultivos de soja/1 cultivo de milho), além de média adição de C ($6-8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) de carbono via resíduo, resultando em uma baixa taxa de recuperação observada no presente estudo (60,6 %) (Figura 22).

De maneira geral, a recuperação do estoque original variou de 60,6 a 116,5 %, porém, excluindo-se os extremos observa-se uma taxa de recuperação de 79,5 a 97,6%.

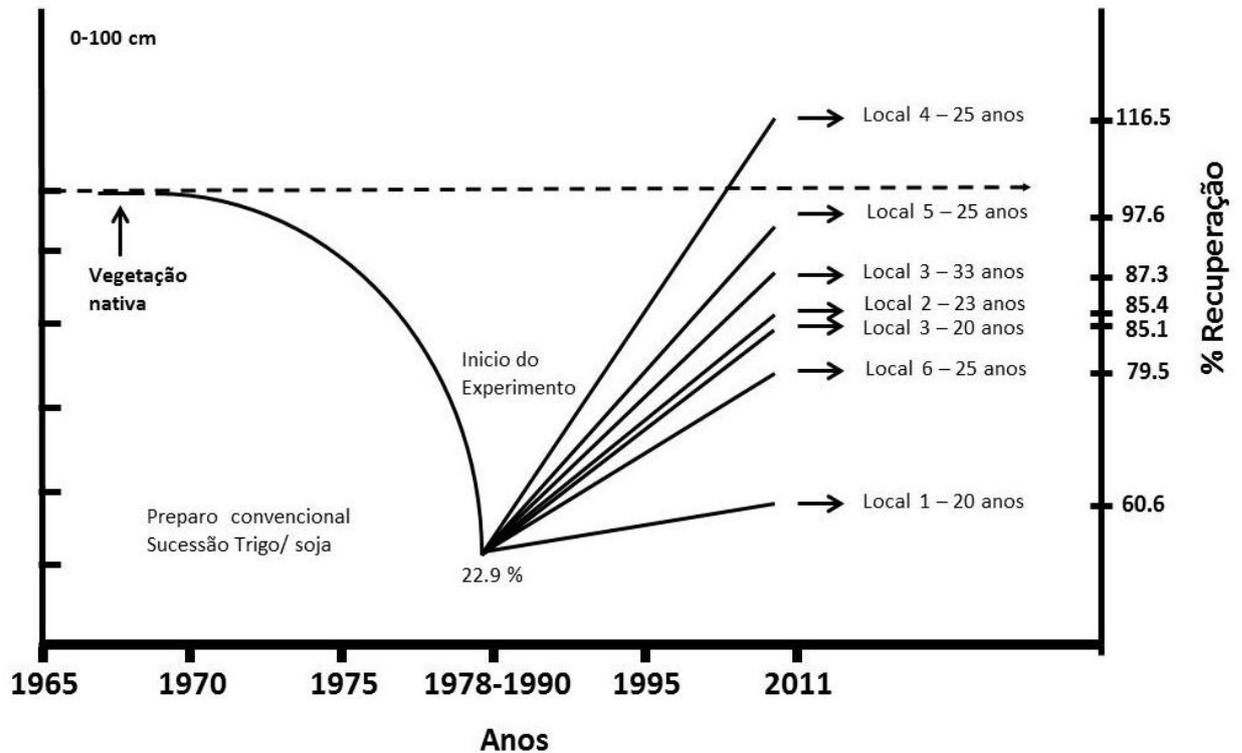


Figura 22 – Cenário de perda e ganho de estoque de C em função do sistema de manejo ao longo dos anos.

2.5.5 Redistribuição e retenção de carbono orgânico particulado e carbono associado aos minerais no perfil do solo.

Baseado nos locais 4 (Lagoa Vermelha - RS) e 5 (Cruz Alta - RS) em que houve incremento expressivo do estoque de C ao longo do perfil inclusive em profundidade resolveu-se estudar a redistribuição do COP e COAM no perfil.

A concentração de COP no Latossolo argiloso de Lagoa Vermelha (local 4) variou de 13,5 ($\pm 0,64$) a 36,1 ($\pm 1,50$) g kg^{-1} sob SPD e de 7,9 ($\pm 1,84$) a 35,5 ($\pm 2,72$) g kg^{-1} sob CN (Figura 23). Os valores de COP do SPD foram superiores aos observados para o CN de 30-100 cm de profundidade, o que pode ter indicado que a diferença no tipo de vegetação pode afetar também a percolação do COP para camadas mais profundas. Nas camadas superficiais não foram verificadas diferenças entre os manejos. A maior concentração de COP sob SPD pode ser resultado do maior aporte de resíduos sobre o solo.

A concentração de COAM no Latossolo argiloso de Lagoa Vermelha (local 4) variou de $13,5 (\pm 0,64)$ a $36,1 (\pm 1,50)$ g kg^{-1} sob SPD e de $7,9 (\pm 1,84)$ a $35,5 (\pm 2,72)$ g kg^{-1} sob CN (Figura 23). Os valores de COAM do SPD foram superiores aos observados para o CN de até 30 cm de profundidade, depois disso se inverteu.

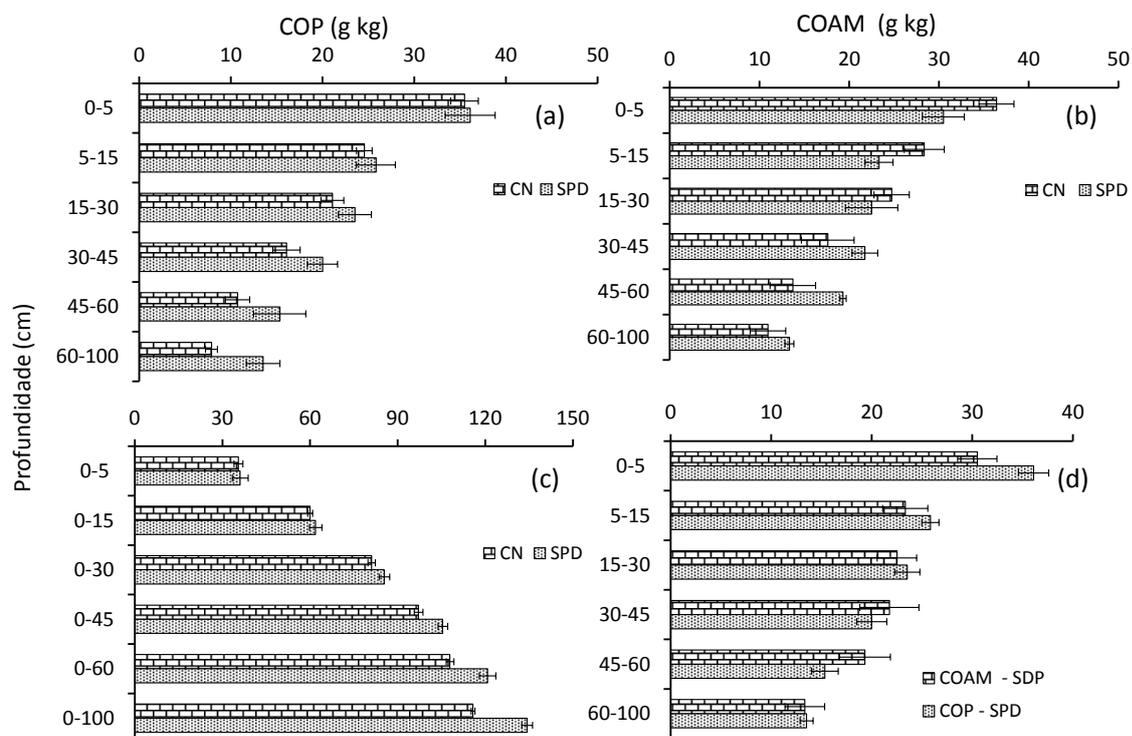


Figura 23 – Distribuição do carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COAM). Local 4 (Lagoa Vermelha - RS). (a), (b) e (d) camada estratificada. (c) camada acumulada. SPD = sistema plantio direto; CN = campo nativo.

No Local 5 (Cruz Alta - RS), os valores de COP variaram de $2,25 (\pm 0,87)$ a $15,8 (\pm 3,08)$ g kg^{-1} sob SPD e de $0,37 (\pm 0,15)$ a $0,56 (\pm 0,31)$ g kg^{-1} sob CN (Figura 24). O SPD apresentou maior concentração de COP em comparação ao CN em todas as camadas.

A COAM no Latossolo argiloso de Cruz Alta (Local 5) variou de $7,93 (\pm 0,53)$ a $14,9 (\pm 1,23)$ g kg^{-1} sob SPD e de $5,6 (\pm 0,59)$ a $11,0 (\pm 0,48)$ g kg^{-1} sob CN (Figura 24). Os valores de COAM do SPD foram superiores aos observados para o CN em todas as profundidades.

As diferentes concentrações de COP nos dois solos apresentados podem estar associados a diferenças na composição mineralógica (Tabela 2) que afeta a sorção e desorção de MOS da superfície dos minerais e consequentemente o equilíbrio solo-solução. Enquanto

que Cruz Alta apresenta apenas $63,5 \text{ g kg}^{-1}$ de óxidos de ferro, Lagoa vermelha apresenta 222 g kg^{-1} . Os maiores valores de COP do Latossolo de Lagoa Vermelha podem estar associados a menor mineralização da MOS decorrente da menor temperatura média na região.

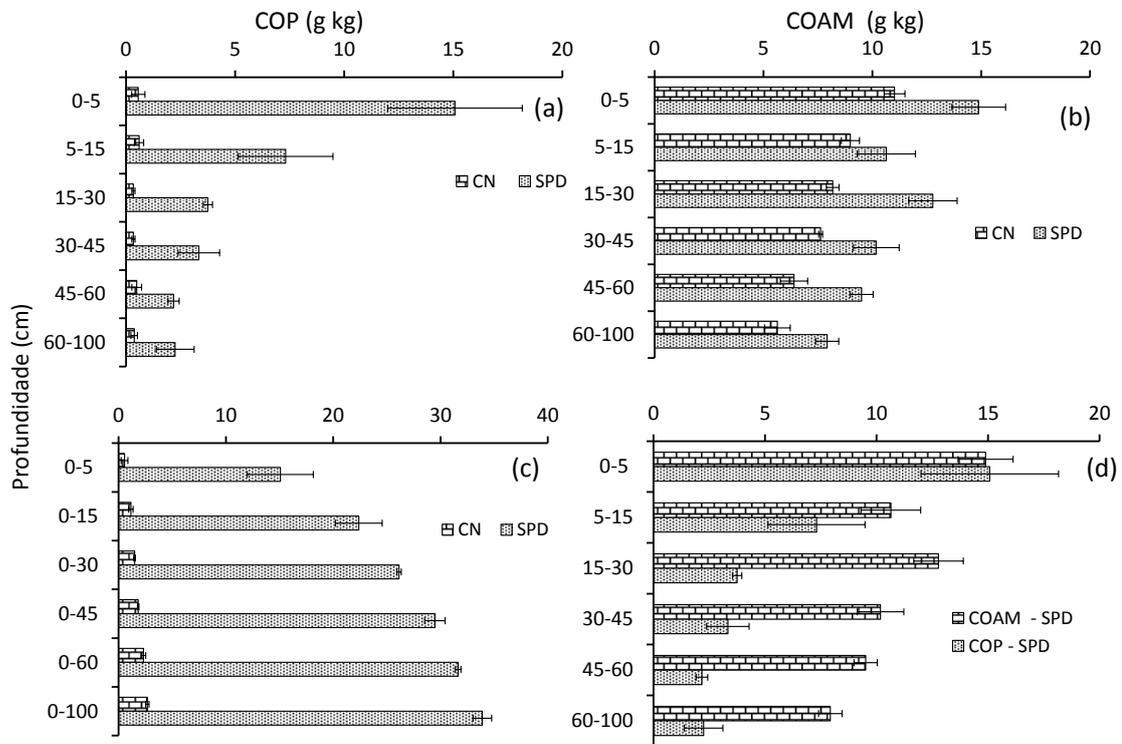


Figura 24 – Distribuição do carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COAM). Local 5 (Cruz Alta - RS). (a), (b) e (d) camada estratificada. (c) camada acumulada. SP = sistema plantio direto; CN = campo nativo.

Os Latossolos do Rio Grande do sul apresentaram elevados teores de óxidos de ferro (Tabela 1) e tem uma boa drenagem no perfil, isso associado a baixas temperaturas médias anuais como é o caso de Lagoa Vermelha e Cruz Alta poderia explicar a translocação do carbono particulado até o horizonte profundo sugerido por Wright et al., (2007).

Recentemente, Chabbi et al., (2009) em clima temperado identificou “tongues” (MOS jovem em zonas visualmente identificáveis em forma de línguas) que foram responsáveis pela deposição de C em horizontes profundos (0,60-1,40 m de profundidade). Os mesmos autores indicaram que essas línguas têm duas vezes maior teor de C com relação à matriz do solo adjacente. Esta distribuição heterogênea do C estabilizado deve ser levada em conta, quando se estuda o sequestro de C em horizontes profundos do solo. Nessas línguas, o aporte de matéria orgânica fresca pode ser importante, proporcionando, assim, a biomassa microbiana com o substrato para a co-metabolismo para a degradação de estruturas quimicamente

recalcitrantes, tais como a lignina e compostos alifáticos de cadeia longa (CHABBI et al., 2009).

Sanderman et al. (2008), sugeriram um modelo para explicar a translocação do C no perfil, afirmando que a decomposição provavelmente ocorre em poros menores com transporte para baixo (vertical) que é dominado pelo fluxo de macroporos durante as infiltrações da água da chuva. Esse compartimento é alimentado pela sorção de compostos orgânicos lixiviados por cima e por processamento microbiano do material menos solúvel. Com o aumento da profundidade, o processo resulta no compartimento reativo do solo, sendo composto principalmente de metabolitos microbianos altamente alterados. A teoria de Sanderman et al. (2008) vem de encontro ao presente estudo, pois aqui tratamos de SPD consolidado que caracteriza-se pela preservação de macroagregados (NICOLOSO, 2009 e TIVET et al., 2013) maior acúmulo de palha associado ao acréscimo de C, elevada CTC, imobilização de N menor do que a mineralização, e maior ciclagem de nutrientes (SÁ et al., 2004). Estes resultados têm implicações muito significativas para o potencial de sequestro de C subtropical. Nestas regiões, existe aproximadamente 750 milhões de ha de Latossolos (BODDEY et al., 2010).

O aumento na proporção dos macroagregados no SPD já foi comprovado (NICOLOSO, 2009; FERREIRA, 2009; TIVET et al., 2013). Entretanto no presente estudo foi feita uma caracterização dos grandes macroagregados (> 19 mm) comparando o Latossolo Vermelho argiloso com o campo nativo vizinho e também do Neossolo Quartzarênico com o campo nativo. Observou-se que o SPD foi 23% superior no número de macroagregados em relação ao CN na camada de 0-5 cm, essa diferença reduziu para 6% na camada de 5-15 cm. No Neossolo Quartzarênico esse incremento foi de 58 e 38 % nas camadas de 0-5 e 5-15 cm, respectivamente em relação ao CN.

Esse processo de macroagregação só ocorre em sistemas conservacionistas de longa duração onde a perturbação é mínima, o que favorece o fluxo contínuo de C e cria uma frente de tamponamento através da liberação de açúcares simples, proteínas interestratificadas em polissacarídeos, polifenóis e compostos de lignina, estimulando uma zona ativa de decomposição (SÁ et al., 2008).

Portanto, essa formação de grandes macroagregados associado a maior estabilidade (WILLIAMS & WIEL, 2004), e a continuidade e verticalidade (SASAL et al., 2006) dos bioporos formados pelo sistema radicular do nabo-forrageiro são determinantes para justificar o aumento da translocação do C em profundidade. Diante disso se ilustrou um modelo conceitual adaptado de Sanderman et al., (2008).

2.6 Conclusões

Os dados apresentados indicam que o Local 1 (Santa Rosa) foi o que mais reduziu o estoque de C pela conversão do CN para sistema de cultivos, variando de 32 a 39%.

O estoque de C superficial (0-5 cm) foi recuperado integralmente nos locais Local 2 (Manoel Viana), Local 3 (Palmeira das Missões), Local 4 (Lagoa Vermelha) e Local 5 (Cruz Alta), sendo essa recuperação de 144% para o Neossolo Quartzarênico e variando de 100 a 122 % para os Latossolos argilosos. Esse efeito mais superficial pode estar associado principalmente a mineralização média mais intensa da matéria orgânica causada pela temperatura média mais elevada nestas regiões do que na região de Lagoa Vermelha e Cruz Alta.

As maiores alterações, no que diz respeito à redistribuição e incremento de estoque de C, ocorreram nos locais 4 (Lagoa Vermelha) e 5 (Cruz Alta).

O Latossolo Vermelho argiloso (Lagoa Vermelha) obteve uma taxa de acúmulo de C de $0,71 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na camada de 0-100 cm (decorrente desde a conversão da área para agricultura), enquanto que a susuperfície (60-100 cm) armazenou 73,4 % desse C.

Houve incremento nas concentrações de COP nos locais de Lagoa Vermelha e Cruz Alta em todo perfil em relação ao CN, que pode ser explicado pelas mais baixas temperaturas médias anuais, altitudes altas, elevada precipitação anual e pelo SPD de longa duração que favoreceu a continuidade e verticalidade dos bioporos formados pelo sistema radicular do nabo-forrageiro que são determinantes para justificar o aumento da translocação do COP em profundidade.

2.7 Referências

ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. & FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, p. 115-119, 1995.

AMADO, T. J.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P. C.; SPAGNOLLO, E.; CAMPOS, B-H. C.; VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Brazil. **Journal of Environmental Quality**, v. 35, n. 4, p. 1599-1607, 2006.

AMADO, T. J. C.; PERES, R. B.; COSTA, J. A.; NICOLOSO, R. S.; TEIXEIRA, T. G. A safra recorde analisada pelos mapas de rendimento no RS. **Revista Plantio Direto**, n. 101, p. 18-123, 2007.

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo no ambiente subtropical. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., Recife, 2005. Palestras. Recife, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.

BABUJIA, L. C.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BROOKES, P. C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 42, n. 12, p. 2174–2181, 2010

BAYER, C. Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos. 1996. 240 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; DIEKOW, J.; AMADO, T. J. C. C and N stocks and the role of molecular recalcitrance and organomineral interaction in stabilizing soil organic matter in a subtropical Alfisol managed under no-tillage. **Geoderma**, v. 133, n. 3, p. 258-268, 2006.

BAYER, C.; AMADO, T. J. C.; TORNQUIST, C. G.; CERRI, C. E. P.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; NICOLOSO, R. S.; CARVALHO, P. C. F. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L.C. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: editora, 2011. V.VII, cap.2, p. 55-118.

BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; SANTOS, H. P.; DENARDIN, J. E.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; ALVES, B. J. R. & URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, v. 16, n. 2, p. 784–795, 2010.

BOLDRINI, I. Campos do RS: caracterização fisionômica e problemática ocupacional. Boletim do Instituto de Biociências/UFRGS, PA, n. 56, p. 1-39, 1997.

BONO, A.; ALVAREZ, R.; BUSCHIAZZO, D. E.; CANTET, R. J.C. Tillage effects on soil carbon balance in a semiarid agroecosystem. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 4, p. 1140-1149, 2008.

BORTOLON, E. S. O. Simulação do impacto da agricultura sobre os estoques de carbono orgânico do solo e o balanço de CO₂ regionais integrando o modelo Century e sistemas de informação geográfica. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. 161p. (Tese de Doutorado)

BRASIL. Ministério da Agricultura. Divisão de Pesquisa Pedológica. Levantamento e reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. Recife, MA-DPP/AS-DRNR/INCRA-RS, p. 431, 1973.

CAMBARDELLA, C. A., & E. T. ELLIOT. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.

CAMPOS, B. H.; AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; NICOLOSO, R. S.; FIORIN, J. Carbon stock and its compartments in a subtropical oxisol under long-term tillage and crop rotation systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 3, p. 805-817, 2011.

CAMPOS, B. C. Dinâmica do carbono em Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo de solo e de culturas. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2006. 188p. (Tese de Doutorado).

CHABBI, A.; KÖGEL-KNABNER, I.; RUMPEL, C. Stabilised carbon in subsoil horizons is located in spatially distinct parts of the soil profile. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 2, p. 256–271, 2009.

CORRÊA, J. C. Efeito de métodos de cultivo em algumas propriedades físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso do estado do Amazonas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 20, n. 11, p. 1317-1322, 1985.

DERPSCH, R. & FRIEDRICH, T. Global overview of conservation agriculture adoption. *In: Proceedings of the 4th World Congress on Conservation Agriculture* (ed. P.K.Joshi), pp. 429–438. Lead Papers, New Delhi, India, 2009.

DICK, D. P. Sequestro de C e composição química da matéria orgânica do solo em ambientes subtropicais. *In: Anais do X Encontro Brasileiro de Substâncias Húmicas*. Santo Antônio de Goiás, Goiás, 2013.

DICK, D. P.; REIS, C. S.; BAYER, C.; CALDAS, J. S. Carbon Sequestration in Subtropical Oxisol Profiles: Retention Capacity and Effect of Soil Management. *In: Jianming Xu; Jianjun Wu; Yan He (Eds.). Functions of Natural Organic Matter in Changing Environment*, pp. 353-358, 2013.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil & Tillage Research**, v. 81, p. 87-95, 2005.

DON, A.; SCHOLTEN T.; SCHULZE E-D. Conversion of cropland into grassland: implications for soil organic carbon stocks in two soils with different texture. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 1, p. 53–62, 2009.

ELLERT, B. H. & BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995.

ELLIOTT, E. T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 50, n. 3, p. 627–633, 1986.

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

FERREIRA, D. F. **Sisvar versão 5.3 (Biud 75)**. Sistemas de análises de variância para dados balanceados: programa de análises estatísticas e planejamento de experimentos. Lavras, MG, Universidade Federal de Lavras, 2010.

FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M.; BRIEDIS C. & FIGUEIREDO, A. G. Desempenho de genótipos de milho cultivados com diferentes quantidades de palha de aveia preta e doses de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 2, p. 173-179, 2009.

FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M.; HARMS, M. G.; MIARA, S.; BRIEDIS, C.; QUADROS NETTO, C.; SANTOS, J. B.; CANALLI, L. B. S.; DIAS, C. T. S. Relação de estratificação como indicador do sequestro de carbono em macroagregados de Latossolo sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 42, n. 4, p. 645-652, 2012.

GASSEN, D. N. A agricultura brasileira e a Rio + 20. **Revista Plantio Direto**, v. 128, p. 48, 2012.

GOMES, A. S.; PATELLA, J. F. & PAULLETTA, E. A. Efeitos de sistemas e tempo de cultivo sobre a estrutura de um solo Podzólico Vermelho Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 2, n. 1, p. 17-21, 1978.

HARRISON, R. B.; FOOTEN, P. W. and STRAHM B.D. Deep soil horizons: Contribution and importance to soil C pools and in assessing whole-ecosystem response to management and global change. **Forest Science**, v. 57, n. 1, p. 67-76, 2011.

JOBÁGY, E. G.; and Jackson, R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. **Ecological Applications**, v. 10, n. 2, p. 423 – 436. 2000.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v. 123, n. 1, p. 1–22, 2004.

LOPES F.; MIELNICZUK J.; BORTOLON E. O.; TORNQUIST, C. G.; GIASSON E. Simulações espacialmente explícitas dos estoques de carbono orgânico de um LATOSSOLO BRUNO por meio da integração do modelo century com GIS. **Ciência Rural**, v. 43, n. 12, p. 2168-2174, 2013.

LONGHI-WAGNER, H. M. Diversidade florística dos campos sul-brasileiros. In: Jardim, M. A.; Bastos, M. N.; Santos, J.U. M. dos (eds.) Desafios da Botânica Brasileira no novo Milênio: Inventário, Sistematização e Conservação da Diversidade Vegetal. 54. Congresso de Botânica - Mesa Redonda. Belém: MPEG/UFRA/Embrapa, 2003. p. 117-120.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.; Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 175-187, 2004.

INSTITUTO DE PESQUISAS AGRONÔMICAS. Atlas agroclimático do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: **Secretaria da Agricultura e Abastecimento**, v. 1, 102p, 1989.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F. F. & DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In CURI, N., MARQUES, J.J., GUILHERME, L.R.G., LIMA, J.M., LOPES, A.S., ALVAREZ.V., V.H. (ed) **Tópicos em Ciência do solo** 3, Viçosa, 2003, p. 209-248.

MORENO, J. A. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonização, Seção de Geografia, 1961, 46p.

MUELLER, C. W.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil organic carbon stocks, distribution, and composition affected by historic land use changes on adjacent sites. **Biology and Fertility of Soils**, v. 45, n. 4, p. 347–359, 2009.

MUZILLI, O. O plantio direto no Brasil. Campinas: Fundação Cargill, 1985.

NELSON, D. W. & SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L; HELMKE, P.A. & LOEPPERT, R.H., eds. Methods of soil analysis: chemical methods. Part 3. Madison, **American Society of America**, 1996. p. 961-1010.

NICOLOSO, R. S.; AMADO, T. J. C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M. E.; GIRARDELLO, V. C. & BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1735-1742 , 2008.

NICOLOSO, R. S. Mecanismos de estabilização do carbono orgânico do solo em agroecossistemas de clima temperado e sub-tropical. 2009, 108f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

OSHER, L. J.; MATSON, P. A.; AMUNDSON R. Effect of land use change on soil carbon in Hawaii. **Biogeochemistry**, v. 65, n. 2, p. 213–232, 2004.

PILLAR, V. P.; MÜLLER, S. C.; CASTILHOS, Z. M. S. & JACQUES, A. V. A. **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília, MMA, p. 403, 2009.

PIVA, J. T.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; ZANATTA, J.A.; DE MORAES, A.; PAULETTI, V.; TOMAZI, M.; PERGHER, M. No-till reduces global warming potential in a subtropical Ferralsol. **Plant and Soil**, v. 361, n. 1-2, p. 359-373, 2012.

POWLSON, D. S.; WHITMORE, A. P.; GOULDING, K. W. T. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. **European Journal of Soil Science**, v. 62, n. 1, p. 42-55, 2011.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, v. 27, p. 29-48, 2003.

REIS, C. E. S. Estoque e qualidade da matéria orgânica e retenção de carbono em perfis de dois Latossolos subtropicais sob diferentes sistemas de manejo. 2012, 131f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RHEINHEIMER, D. S.; CAMPOS, B. C.; GIACOMINI, S.; CONCEIÇÃO, P. C. & BORTOLUZZI, E.C. Comparação de métodos de determinação de carbono orgânico total no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 435-440, 2008.

RUMPEL, C. & KOGEL-KNABNER, I. Deep soil organic matter-a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. **Plant and Soil**, v. 338, n. 1-2, p. 143-158, 2011.

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**, v. 65, n. 5, p. 1486-1499, 2001.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E.; FORNARI, A.; Sá, M. F. M.; VENSKE FILHO, S. P.; SEGUY, L.; BOUZINAC, S. & PAULLETI, V. O plantio direto como base do sistema de produção visando o sequestro de carbono. **Revista Plantio Direto**, v. 84, p. 45-61, 2004.

SÁ, J. C. M.; SA, M. F. M.; SANTOS, J. B.; FERREIRA, A.O. Dinâmica da Matéria Orgânica nos Campos Gerais.. In: I. Santos, Gabriel de Araújo (Ed.). II. Silva, Leandro Souza da (Ed.). III. Canellas, Luciano Pasqualoto (Ed.). IV. Camargo, Flávio A. de O.(Ed).. (Org.). **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2 ed. Porto Alegre: Metropole, 1:443-461, 2008.

SÁ, J. C. M.; SEGUY, L.; TIVET, F.; LAL, R.; BOUZINAC, S.; BORSZOWSKI, P. R.; BRIEDIS, C.; SANTOS, J. B. D.; SA, M. F. M.; BERTOLONI, C.; HARTMAN, D.D.C.; ROSA, J. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in Oxisols of sub-tropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation and Development**, 2013.

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

SANDERMAN, J.; BALDOCK, J. A.; AMUNDSON, R. Dissolved organic carbon chemistry and dynamics in contrasting forest and grassland soils. **Biogeochemistry**, v. 89, n. 2, pp. 181–198, 2008.

SANTOS, J. B. Carbono e nitrogênio em classes de solos com diferentes texturas e tempo de adoção do sistema plantio direto - espacialização e contribuição do sistema. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2010. 145p. (Tese de Doutorado).

SASAL, M. C.; ANDRIULO, A. E. & TABOADA, M. A. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. **Soil and Tillage Research**, v. 87, n. 1, p. 9-18, 2006.

STEWART, C. E.; PAUSTIAN, K.; CONANT, R. T.; PLANTE, A. F.; SIX, J. Soil C saturation: concept, evidence, and evaluation. **Biogeochemistry**, v. 86, n. 1, p. 19–31, 2007.

TIVET, F.; SÁ, J. C. M.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; BORSZOWSKI, P. R.; BURKNER, J. D. S.; FARIAS, A.; EURICH, G.; HARTMAN, D. D. C.; NADOLNY, M. J.; BOUZINAC, S. L. S. Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 126, p. 203–218, 2013.

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*, v. 150. p.404-414, 2009.

TONNEIJCK, F. H. & JONGMANS, A. G. The influence of bioturbation on the vertical distribution of soil organic matter in volcanic ash soils: a case study in northern Ecuador. **European Journal of Soil Science**, v. 59, n. 6, p. 1063–1075, 2008.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 213-223, 2011.

VIEIRA, M. J. & MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, p. 873-882, 1984.

WILLIAMS, S. M. & WEIL, R. R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 4, p. 1403-1409, 2004.

WRIGHT A. L.; DOU F. AND HONS F. M. Crop species and tillage effects on carbon sequestration in subsurface soil. **Soil Science**, v. 172, n. 2, p. 124–131, 2007.

ZHANG, J. H.; LIU, S. Z. & ZHONG, X. H. Distribution of soil organic carbon and phosphorus on an eroded hillslope of the rangeland in the northern Tibet Plateau, China. **European Journal of Soil Science**, v. 57, n. 3, p. 365–371, 2006.

3 CAPÍTULO II – FATORES DETERMINANTES NO ACÚMULO DE CARBONO EM CAMADA SUPERFICIAL E PROFUNDA DE SOLOS AGRICOLAS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO¹

3.1 Resumo

No contexto do ciclo global C e das mudanças climáticas, é importante entender o que leva o acúmulo de grandes quantidades de C no horizonte superficial e abaixo deste em direção ao subsolo. Reconhece-se que esses processos são altamente dependentes do clima, solo, topografia e tipos de vegetação. No entanto, poucos estudos tratam desse tema em solos subtropicais. Neste sentido, o presente estudo visa avaliar os fatores que determinam o acúmulo de C em camada superficial (0-5 e 0-15 cm) e profunda (0,60-1,0 m) de áreas pioneiras na adoção do SPD do Rio Grande do Sul, tendo como comparativo-base à vegetação nativa vizinha. Foram considerados seis locais de amostragem com implantação do SPD das áreas variando de 1978 a 1990, com diferentes gradientes texturais e mineralógicos. As camadas de solo consideradas foram: a) camada superficial (0-5 cm) e b) camada subsuperficial (60-100 cm). O conteúdo de C no solo foi determinado por combustão seca usando um analisador de C/N. O estoque de C no solo foi calculado com base na massa de solo equivalente. Foram realizadas a análise de componentes principais (ACP) no software Statistica versão 7 e utilizada uma matriz de dados composta por 24 variáveis (atributos de clima, relevo e solo da camada superficial e subsuperficial). Foi realizada ainda uma regressão múltipla para modelar o estoque de C na camada de 0-15 e 60-100 cm de profundidade, pelo método “Stepwise”, técnica de seleção de variáveis Forward. As análises estatísticas da regressão foram feitas através do programa JMP IN versão 3.2.1 (SALL et al., 2005), utilizando-se o teste F, a 5% de significância. A partir dos dados originais foram obtidos aproximadamente 20 componentes principais (CPs) na ACP. Destes, apenas 5 CPs apresentaram autovalores acima de um. Os fatores que determinaram o acúmulo de C foram diferentes na condição da camada subsuperficial (60-100 cm) em relação à camada superficial (0-15 cm). Na camada superficial (0-15 cm), a saturação de cálcio, magnésio, CTC efetiva e MOS foram fatores correlacionados positivamente com o estoque de C tanto em SPD como em CN. Na camada subsuperficial (60-100 cm) os atributos que melhor se correlacionaram positivamente com o estoque de C foram altitude e MOS no SPD, e a argila, MOS e óxidos de ferro no CN. A maior altitude (801 m) e a menor temperatura média anual (16,7°C) favoreceram o acúmulo de estoques de C superficial (0-15 cm) e subsuperficial (60-100 cm) no SPD. Sendo, que a mudança de temperatura média anual no horizonte subsuperficial teve correlação mais sensível com o estoque de C ($R^2 = -0,91$) em relação ao horizonte superficial ($R^2 = -0,81$). Isso se deve a mineralização do C ser mais afetado nesse ambiente. O aumento de estoque de C na camada superficial (0-15 cm) acompanhando do aumento da saturação de Ca constitui-se em uma prática que, além de promover a melhoria da fertilidade do solo, ocasiona também positivo impacto ambiental por atuar no dreno de C no solo.

Palavras-chave: Solos subtropicais. Carbono profundo. Plantio direto. Saturação de cálcio.

¹Artigo elaborado de acordo com as normas da revista Soil & Tillage Research.

3.2 Abstract

In the context of the global C cycle and climate change, it is important to understand what leads the accumulation of large amounts of C in the surface horizon and below into the underground. It is recognized that these processes are highly dependent on climate, soil, topography and vegetation types. However, few studies were completed on this issue in subtropical soils. The present study aims to assess the factors that determine the accumulation of C in the subsurface (0-5 and 0-15 cm) and deep (0.60 to 1.0 m) layer of pioneer areas in the adoption of the no-till from Rio Grande do Sul, and as a comparative base to the nearby native vegetation (NV). Six sampling sites with tillage adoption of areas ranging from 1978 to 1990, with different textural and mineralogical gradients were considered. The soil layers were considered: a) surface layer (0-5 cm) and b) subsuperficial layer (60-100 cm). The C content in the soil was determined by dry combustion using a C/N analyzer. The soil C stock has been calculated based on the equivalent mass of soil. The principal component analysis (PCA) was performed with the Statistica software version 7 and used a data matrix consisting of 24 variables (attributes of climate, topography and soil surface and subsurface layer). Multiple regression was also performed to model the C stock in the layer 0-15 and 60-100 cm depth, the method of "Stepwise" selection technique of Forward variables. Statistical regression analyzes were performed using the JMP in program, version 3.2.1, (SALL et al. 2005), using the F test at 5 % significance. Based on the original data approximately 20 principal components (PCs) were obtained in the PCA. These, only 5 PCs had eigenvalues above one. Factors that determined the C accumulation were different in the condition of subsurface layer (60-100 cm) in relation to the surface layer (0-15 cm). At the surface layer (0-15 cm), the saturation of calcium, magnesium, cation exchange capacity (CEC) and soil organic matter (SOM) were factors positively correlated with the C stock in both no-till and NV. In the subsurface layer (60-100 cm) the attributes that best correlated positively with the C stock in were altitude and SOM in the no-till, and clay, SOM and iron oxides in NV. The highest altitude (801 m) and lower mean annual temperature (16.7°C) favored the accumulation of C stock of surface (0-15 cm) and subsurface (60-100 cm) C in SPD. Being that the change in mean annual temperature in the subsurface horizon showed a more sensitive correlation with the C stock ($R^2 = -0.91$) compared to the surface horizon ($R^2 = -0.81$). This is due to C mineralization to be most affected in this environment. Increasing carbon storage in the surface layer (0-15 cm) following the increased saturation of calcium forms and practices that promote the improvement of soil fertility and generates positive environmental impact by acting in drain C in the soil.

Keywords: Subtropical soils. Deep carbon. No-till. Saturation of calcium.

3.3 Introdução

Em geral, o acúmulo de carbono (C) em solos sob sistemas de manejo conservacionistas ocorre principalmente nas camadas superficiais do solo (SÁ & LAL, 2009a; FERREIRA et al., 2012 e FERREIRA et al., 2013a; TIVET et al., 2013). Já o acúmulo de C em camadas profundas (>0,60 m) tem sido registrado como importante em sistemas de longa duração (DIEKOW et al., 2005; BODDEY et al., 2010; BAYER, 2012; REIS, 2012). Nesse sentido, estudos recentes têm questionado a amostragem de solo superficial (0-0,20 ou 0-0,30 m) como estratégia para avaliar corretamente a mudança de estoque de C no perfil do solo induzida por sistemas de preparo e de cultura (BAKER et al., 2007; BODDEY et al., 2010).

Em alguns trabalhos conduzidos em solos de clima temperado e com drenagem deficiente tem sido registrada a reversão de acúmulo de C na camada superficial em solos sob sistema de plantio direto (SPD) quando camadas subsuperficiais são investigadas, anulando parcial ou totalmente o efeito de sequestro de C nas camadas superficiais (BLANCO-CANQUIL & LAL; 2008; POIRIER et al., 2009). Por sua vez, em clima tropical e subtropical, em solos profundos e bem drenados, este efeito não tem sido verificado (SÁ et al., 2001; SISTI et al., 2004; DIECKOW et al., 2005; NICOLOSO, 2009). Em alguns casos, nestes solos a amostragem profunda tem ampliado as taxas de acúmulo de C verificadas na superfície (BODDEY et al., 2010; PIVA et al., 2012; REIS et al., 2012).

A taxa de acúmulo de C pode ser afetada pelas características químicas das camadas superficiais e subsuperficiais do solo. Pesquisas recentes demonstraram o efeito da saturação de bases (V%) e do teor de alumínio (Al) sobre o acúmulo de C superficial (BRIEDIS et al., 2012) e da saturação de cálcio (Ca) no acúmulo de C em subsuperfície de Latossolos (FERREIRA et al., 2013b). BRIEDIS et al. (2012), relataram que o aumento de C superficial (0-0,20 m) está relacionado ao aumento de saturação por bases e à diminuição da saturação por alumínio. Enquanto isso FERREIRA et al. (2013b), encontraram forte relação entre o teor de Ca e o conteúdo de C do solo, avaliando experimento com doses de gesso + calcário. Esse aumento de C acompanhado do aumento do conteúdo de Ca constitui-se em uma prática que, além de promover a melhoria da fertilidade do solo, ocasiona também positivo impacto ambiental por atuar no dreno de C no solo.

O acúmulo de C em horizontes no subsolo tem recebido muita atenção nos últimos anos no clima temperado (CHABBI et al., 2009; RUMPEL & KÖGEL-KNABNER, 2011) e recentemente no clima subtropical (REIS, 2012; DICK et al., 2013a). Apesar do seu baixo teor de C, os horizontes do subsolo contribuem para mais de 50% do total de estoques de C no

solo sob clima temperado (RUMPEL & KÖGEL-KNABNER, 2011) e mais de 70% sob clima subtropical (DICK et al., 2013b) e portanto, precisam ser considerados no ciclo global C.

Nesse contexto do ciclo global C e das mudanças climáticas, é importante entender o que leva o acúmulo de grandes quantidades de C no horizonte superficial e abaixo deste em direção ao subsolo. Reconhece-se que esses processos são altamente dependentes do clima, solo, topografia e tipos de vegetação (RUMPEL & KÖGEL-KNABNER, 2011; DAVY e KOEN, 2013; MCLEOD et al., 2013). As condições ambientais no subsolo podem ser diferentes daquelas em superfície e o C pode ser redistribuído por processos particulares (VON LÜTZOW et al., 2006). Por exemplo, Fierer et al. (2003), observaram que a mineralização de C do subsolo pode ser muito mais sensível à mudança de temperatura do que no horizonte superficial.

Davy & Koen (2013), na Austrália encontraram fortes influências de precipitação, temperatura, densidade, textura e histórico de cultivos sobre os estoques de carbono no solo e sugerem que esses fatores ambientais e de manejo requerem mais consideração ao medir o potencial de acúmulo de carbono no solo. Esses fatores que determinam o processo de acumulação de C em camadas superficiais e profundas sob sistemas conservacionistas de longa duração ainda precisam ser melhor entendidos principalmente em clima subtropical. Nestas regiões, existe aproximadamente 750 milhões de ha de Latossolos (BODDEY et al., 2010) com grande variabilidade de temperatura, precipitação, mineralogia e históricos de manejo do solo que condicionam diferentemente o potencial de acúmulo de C.

Para tanto, o presente estudo visa avaliar os fatores que determinam o acúmulo de C em camada superficial (0-5 e 0-15 cm) e profunda (0,60-1,0 m) de áreas pioneiras na adoção do SPD do Rio Grande do Sul, tendo como comparativo-base a vegetação nativa.

3.4 Material e métodos

3.4.1 Descrição das áreas

Esta descrição já foi feita no capítulo 1 (Tabela 1).

3.4.2 Caracterização química

A fertilidade química do solo foi avaliada em amostras deformadas coletadas nas camadas superficiais (0-0,15 cm) e subsuperficial (0,60-1,0 m), por meio da determinação do

pH, dos teores de C, alumínio (Al), H+Al, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), da capacidade de troca de cátions (CTC), da soma de bases e da saturação por bases, conforme metodologia descrita em Embrapa (1997).

3.4.3 Determinação do conteúdo de carbono (C) no solo

Esta descrição já foi feita no capítulo 1.

3.4.4 Análise estatística

Foram realizadas a Análise de Componentes Principais (ACP) no software Statistica versão 7. Foi utilizada uma matriz de dados composta por 24 variáveis (atributos de clima, relevo e solo da camada superficial (0-15 cm) e subsuperficial (60-100 cm) mensuradas por 35 observações cada (pontos amostrais). A partir dos dados originais foram obtidos aproximadamente 20 componentes principais (CPs) na ACP. Destes, apenas 5 CPs apresentaram autovalores acima de um.

Foi realizada uma regressão múltipla para modelar o estoque de C na camada de 0-15 e 60-100 cm de profundidade, pelo método “Stepwise”, técnica de seleção de variáveis Forward. A análise estatística da regressão foi feita através do programa JMP IN versão 3.2.1 (SALL et al., 2005), utilizando-se o teste F, a 5% de significância.

3.5 Resultados e discussão

3.5.1 Análise de componentes principais dos atributos de clima e solo na camada superficial (0-15 cm)

3.5.1.1 Sistema plantio direto

Os atributos de clima e solo compuseram uma matriz com 24 variáveis originais. A partir desses dados originais foram obtidos 20 CPs na ACP. Destes, apenas 5 CPs apresentaram autovalores acima de um, acumulando 91,7% da variância total presente nos dados, porém, com apenas dois CPs acumularam-se 68,7 % da variância total (Tabela 1).

Dentre os cinco fatores agrupados, e o ajuste do modelo foi capaz de explicar 91,7% das variâncias das variáveis com autovalores maiores que 1 (Tabela 1). O primeiro

componente explicou 50,0% da variabilidade total. Esse componente é constituído pelo estoque de Carbono (0-5 cm), altitude, argila, cálcio, saturação de cálcio, magnésio, CTC pH 7,0 ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC efetiva ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), matéria orgânica (%) e carbono, na camada de 0,05m, com escores positivos e altamente significativos. E temperatura média anual ($^{\circ}\text{C}$), SMP, densidade com escores negativos e altamente significativos. Os componentes principais 1 e 2, juntos, explicaram 68,7% da variabilidade, com acréscimo de 18,6% na proporção acumulada, e Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$) e saturação de alumínio na camada de 0-0,15 m, com escores de 0,79; -0,71 e -0,72 selecionado dentro do segundo fator. A precipitação anual foi o caráter individual, com maior carga fatorial (escore), selecionado dentro do caractere principal (-0,72) que melhor explicou o componente principal 3. No componente principal 4 o fósforo (mg dm^{-3}) foi o caráter individual, com maior carga fatorial (escore), selecionado dentro do segundo fator, dentro do caractere principal (-0,86).

Tabela 1 – Autovalores e variância acumulada obtidos na análise de componentes principais (ACP) a partir dos dados originais de sistema plantio direto (SPD).

Componentes da Variância		Componentes Principais (CPs)				
		1	2	3	4	5
Autovalores		12.00	4.48	2.72	1.74	1.06
Proporção (%)		50.01	18.65	11.35	7.24	4.42
Proporção Acumulada (%)		50.01	68.67	80.02	87.26	91.68

N	Variáveis	Correlação com os CPs					Contribuição aos CPs				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	Estoque de Carbono (0-5 cm)	0.91	-0.17	0.04	0.14	-0.12	0.07	0.01	0.00	0.01	0.01
2	Altitude	0.83	0.12	-0.47	0.09	-0.19	0.06	0.00	0.08	0.00	0.04
3	Temperatura média anual (°C)	-0.86	0.21	0.31	0.10	0.21	0.06	0.01	0.04	0.01	0.04
4	Temperatura máxima (°C)	-0.01	0.79	-0.59	-0.06	0.03	0.00	0.14	0.13	0.00	0.00
5	Temperatura mínima (°C)	-0.12	-0.71	0.63	-0.14	0.21	0.00	0.11	0.15	0.01	0.04
6	Precipitação anual	0.36	-0.56	0.69	-0.06	-0.13	0.01	0.07	0.18	0.00	0.02
7	Umidade relativa (%)	0.27	-0.36	0.06	0.47	0.53	0.01	0.03	0.00	0.13	0.26
8	pH	-0.61	0.60	0.10	-0.20	-0.20	0.03	0.08	0.00	0.02	0.04
9	SMP	-0.90	0.29	0.04	-0.08	-0.09	0.07	0.02	0.00	0.00	0.01
10	Alumínio	0.55	-0.57	-0.48	0.09	-0.14	0.03	0.07	0.08	0.00	0.02
11	Saturação Al	0.20	-0.72	-0.53	0.17	-0.10	0.00	0.11	0.10	0.02	0.01
12	Argila (%)	0.85	0.26	-0.04	0.13	0.29	0.06	0.02	0.00	0.01	0.08
13	Fósforo (mg dm ⁻³)	0.06	-0.29	-0.03	-0.86	-0.11	0.00	0.02	0.00	0.42	0.01
14	Potássio (cmol _c dm ⁻³)	0.62	-0.41	-0.03	-0.59	0.10	0.03	0.04	0.00	0.20	0.01
15	Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	0.82	0.47	0.27	-0.09	0.09	0.06	0.05	0.03	0.00	0.01
16	Saturação Ca	0.88	0.38	0.18	0.03	0.09	0.07	0.03	0.01	0.00	0.01
17	Magnésio	0.87	0.33	0.28	0.08	-0.14	0.06	0.02	0.03	0.00	0.02
18	CTC pH 7,0 (cmol _c dm ⁻³)	0.72	0.55	0.31	-0.20	0.09	0.04	0.07	0.03	0.02	0.01
19	CTC efetiva (cmol _c dm ⁻³)	0.91	0.32	0.21	-0.06	0.00	0.07	0.02	0.02	0.00	0.00
20	Saturação de Bases (%)	0.58	0.37	0.43	0.31	-0.39	0.03	0.03	0.07	0.05	0.14
21	Matéria orgânica (%)	0.97	-0.03	-0.08	-0.08	-0.03	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
22	Carbono (g kg)	0.93	-0.21	-0.11	0.01	-0.15	0.07	0.01	0.00	0.00	0.02
23	Densidade g cm ⁻³	-0.89	0.30	-0.06	-0.07	0.04	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00
24	Óxido de ferro	0.64	0.29	-0.37	-0.32	0.47	0.03	0.02	0.05	0.06	0.21

(em negrito) Caracteres com maiores cargas fatoriais (scores) selecionadas dentro de cada fator.

3.5.1.2 Campo Nativo

Os atributos de clima, relevo, químicos e físicos do solo compuseram uma matriz com 24 variáveis originais. A partir desses dados originais foram obtidos 20 CPs na ACP. Destes, apenas 5 CPs apresentaram autovalores acima de um, acumulando 95,9% da variância total

presente nos dados, porém, com apenas dois CPs acumularam-se 74,8 % da variância total (Tabela 2).

Dentre os cinco fatores agrupados, e o ajuste do modelo foi capaz de explicar 95,9% das variâncias das variáveis com autovalores maiores que 1 (Tabela 2). O primeiro componente explicou 49,3% da variabilidade total. Esse componente é constituído pelo estoque de Carbono (0-5 cm), Cálcio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), saturação de cálcio, magnésio, CTC pH 7,0 ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), CTC efetiva ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), matéria orgânica (%), Carbono (g kg) e óxidos de ferro na camada de 0,05m, com escores positivos e altamente significativos. E temperatura média anual ($^{\circ}\text{C}$) e densidade com escores negativos e altamente significativos.

Os componentes principais 1 e 2, juntos, explicaram 74,8% da variabilidade, com acréscimo de 25,5% na proporção acumulada, a altitude, temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), pH, SMP, alumínio e Potássio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) na camada de 0-0,15 m, com escores de 0,72; -0,84; -0,85; -0,82; 0,94; -0,73, respectivamente, selecionado dentro do segundo fator. A Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$) e a precipitação anual com escores de 0,72 e -0,84, selecionados dentro do terceiro fator.

Tabela 2 – Autovalores e variância acumulada obtidos na análise de componentes principais (ACP) a partir dos dados originais de campo nativo.

Componentes da Variância		Componentes Principais (CPs)				
		1	2	3	4	5
Autovalores		11.84	6.11	2.66	1.42	1.00
Proporção (%)		49.34	25.48	11.07	5.91	4.19
Proporção Acumulada (%)		49.34	74.82	85.88	91.80	95.98

N	Variáveis	Correlação com os CPs					Contribuição aos CPs				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	Estoque de Carbono (0-5 cm)	0.98	0.07	-0.01	0.00	-0.02	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Altitude	0.59	0.72	0.20	-0.24	0.04	0.03	0.08	0.01	0.04	0.00
3	Temperatura média anual (°C)	-0.75	-0.42	-0.31	0.33	0.07	0.05	0.03	0.04	0.07	0.01
4	Temperatura máxima (°C)	-0.10	0.62	-0.75	0.14	-0.12	0.00	0.06	0.21	0.01	0.01
5	Temperatura mínima (°C)	0.18	-0.84	0.48	0.08	0.09	0.00	0.12	0.09	0.00	0.01
6	Precipitação anual	0.27	-0.21	0.85	0.27	-0.26	0.01	0.01	0.27	0.05	0.06
7	Umidade relativa (%)	0.25	-0.11	0.33	-0.09	0.90	0.01	0.00	0.04	0.01	0.80
8	pH	0.32	-0.85	-0.33	-0.08	0.01	0.01	0.12	0.04	0.00	0.00
9	SMP	-0.45	-0.82	-0.23	-0.24	-0.01	0.02	0.11	0.02	0.04	0.00
10	Alumínio	-0.19	0.94	-0.04	0.13	0.13	0.00	0.15	0.00	0.01	0.02
11	Saturação Al	-0.64	0.65	0.33	0.24	0.00	0.03	0.07	0.04	0.04	0.00
12	Argila (%)	0.67	0.40	-0.48	0.29	0.20	0.04	0.03	0.09	0.06	0.04
13	Fósforo (mg dm ⁻³)	-0.49	-0.35	-0.30	0.36	0.16	0.02	0.02	0.03	0.09	0.03
14	Potássio (cmol _c dm ⁻³)	0.41	-0.73	-0.13	0.48	0.00	0.01	0.09	0.01	0.16	0.00
15	Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	0.94	-0.26	-0.01	0.19	-0.04	0.07	0.01	0.00	0.03	0.00
16	Saturação Ca	0.98	-0.10	-0.05	0.10	-0.02	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00
17	Magnésio	0.97	0.00	-0.01	-0.19	-0.04	0.08	0.00	0.00	0.02	0.00
18	CTC pH 7,0 (cmol _c dm ⁻³)	0.84	-0.50	-0.07	0.17	-0.04	0.06	0.04	0.00	0.02	0.00
19	CTC efetiva (cmol _c dm ⁻³)	0.99	-0.03	-0.02	0.09	-0.02	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00
20	Saturação de Bases (%)	0.61	-0.29	-0.35	-0.62	0.01	0.03	0.01	0.05	0.27	0.00
21	Matéria orgânica (%)	0.99	0.08	0.04	0.05	-0.03	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
22	Carbono (g kg ⁻¹)	0.99	0.09	0.03	-0.06	-0.04	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
23	Densidade g cm ⁻³	-0.81	-0.47	-0.22	-0.12	0.05	0.06	0.04	0.02	0.01	0.00
24	Óxido de ferro	0.86	0.32	-0.30	0.21	0.11	0.06	0.02	0.03	0.03	0.01

(em negrito) Caracteres com maiores cargas fatoriais (scores) selecionadas dentro de cada fator.

3.5.2 Atributos determinantes no acúmulo de C da camada superficial de SPD de longa duração e campo nativo

Os atributos que melhor se correlacionaram positivamente com o estoque de C na camada superficial no SPD foram altitude, saturação de cálcio, magnésio, CTC efetiva e MOS (matéria orgânica do solo) (Tabela 3, Figura 1). A temperatura média anual e densidade se correlacionaram negativamente com o estoque de C nessa camada.

Os atributos que melhor se correlacionaram positivamente com o estoque de C na camada superficial no campo nativo (CN), foram cálcio, saturação de cálcio, magnésio, $CTC_{pH7,0}$, $CTC_{efetiva}$, MOS e óxidos de ferro (Tabela 4, Figura 2). A temperatura média anual, fósforo e densidade se correlacionaram negativamente com o estoque de C.

Os maiores estoques de C no SPD foram encontrados no local de Lagoa Vermelha, variando de 47,8 a 52,9 $Mg\ ha^{-1}$ (Figura 1), o que coincidiu com a maior altitude (801 m) e na menor temperatura média anual (16,7 °C). Já o menor estoque de C foi encontrado no local de Manoel Viana variando de 15,1 a 21,8 $Mg\ ha^{-1}$, o que coincidiu com a menor altitude (113 m) e na maior temperatura média anual (20,3 °C).

Observou-se uma grande afinidade entre a saturação de cálcio e o estoque de C do solo na camada superficial (0-15 cm) tanto para as áreas de SPD de longa duração como para o campo nativo das áreas vizinhas. No presente estudo a variação média da saturação de cálcio na $CTC_{pH7,0}$ foi de 47,57 a 59,50 $cmol_c\ dm^{-3}$ para Latossolos argilosos e de 24,56 a 28,73 $cmol_c\ dm^{-3}$ para o Neossolo Quartzarênico sob SPD (Figura 1). No campo nativo a variação média foi de 0,50 a 5,34 $cmol_c\ dm^{-3}$ para Latossolos argilosos e de 0,77 a 1,03 $cmol_c\ dm^{-3}$ para o Neossolo Quartzarênico (Figura 2). Briedis et al. (2012) na região dos Campos Gerais (Paraná, Brasil) em análise de uma secção da fração argila, pelo uso de microscopia eletrônica de varredura com analisador de raios X por dispersão de energia, revelou que o Ca^{2+} correlacionou-se com o carbono em escala micrométrica. Ferreira et al. (2013b) em dois solos do Rio Grande Sul encontrou a mesma relação e com o maior incremento de C do solo observado, quando a saturação por Ca na $CTC_{pH7,0}$ foi de 56,1 e 64,3%. No presente estudo essa variação média foi de 49,3 a 59,5% para Latossolos argilosos e de 24,5 a 29,7% para o Neossolo Quartzarênico (Figura 1). Com isso, no presente estudo pode-se afirmar que o aumento de estoque de C acompanhando do aumento da saturação de Ca constitui-se em uma prática que, além de promover a melhoria da fertilidade do solo, ocasiona também positivo impacto ambiental por atuar no dreno de C no solo.

Observou-se também uma grande afinidade entre a CTC efetiva e o estoque de C do solo na camada superficial (0-15 cm) tanto para as áreas de SPD como sob campo nativo. A variação média da CTC efetiva foi de 8,9 a 14,84 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para Latossolos argilosos e de 3,91 a 5,28 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o Neossolo Quartzarênico sob SPD (Figura 1). E variação média de 2,57 a 12,91 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para Latossolos argilosos e de 1,85 a 2,46 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o Neossolo Quartzarênico sob campo nativo (Figura 2). Sá et al. (2009b) e Briedis et al. (2012) em SPD no Paraná, também encontraram relação positiva entre CTC efetiva e carbono. Soares & Alleoni (2008), ao avaliar 30 diferentes tipos de solos do Estado de São Paulo, obtiveram contribuição média do carbono na CTC de 164 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

No SPD, a melhoria da fertilidade do solo, estimulada pela decomposição de novos resíduos de culturas que transportam alta carga por unidade de C, aumentam a capacidade troca catiônica (SÁ et al., 2009b). Este aumento da CTC já foi mais do que a relatada por Burle et al. (1997), e Bayer e Bertol (1999) para Latossolos em Sul do Brasil.

A densidade do solo se correlacionou negativamente ao estoque de C na camada superficial (0-15 cm). A variação média da densidade (g cm^{-3}) foi de 1,32 a 1,73 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ sob SPD (Figura 1). E variação média de 1,01 a 5,34 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para Latossolos argilosos e de 0,77 a 1,03 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ sob campo nativo (Figura 2).

Tabela 3 – Correlação entre variáveis para estoque de carbono no solo na camada de 0-15 cm em SPD no Rio Grande do Sul.

	C	A	TMa	TMx	TMn	PA	UR	pH	SMP	AL	M	Clay	P	K	Ca	%Ca	Mg	CTCn	CTCe	V%	MOS	c	D	OF
C	1																							
A	0.77	1																						
TMa	-0.81	-0.90	1																					
TMx	-0.18	0.33	0.03	1																				
TMn	-0.02	-0.53	0.15	-0.93	1																			
PA	0.43	-0.10	-0.21	-0.83	0.76	1																		
UR	0.37	0.15	-0.18	-0.38	0.32	0.12	1																	
pH	-0.63	-0.44	0.58	0.38	-0.27	-0.52	-0.40	1																
SMP	-0.86	-0.69	0.76	0.18	-0.06	-0.50	-0.30	0.85	1															
AL	0.54	0.61	-0.73	-0.19	0.03	0.22	0.27	-0.66	-0.66	1														
m	0.26	0.32	-0.44	-0.26	0.12	0.14	0.28	-0.59	-0.41	0.90	1													
Clay	0.68	0.68	-0.56	0.25	-0.28	0.15	0.24	-0.51	-0.79	0.33	0.02	1												
P	0.04	-0.02	-0.20	-0.17	0.25	0.18	-0.21	0.03	-0.03	0.15	0.12	-0.17	1											
K	0.54	0.43	-0.71	-0.28	0.31	0.44	0.07	-0.54	-0.63	0.48	0.25	0.37	0.58	1										
Ca	0.64	0.57	-0.49	0.21	-0.22	0.23	0.06	-0.19	-0.59	0.06	-0.30	0.82	-0.03	0.34	1									
%Ca	0.73	0.65	-0.56	0.20	-0.25	0.26	0.11	-0.35	-0.73	0.20	-0.16	0.90	-0.10	0.35	0.97	1								
Mg	0.74	0.66	-0.61	0.07	-0.18	0.33	0.12	-0.28	-0.65	0.23	-0.15	0.78	-0.08	0.32	0.93	0.94	1							
CTCn	0.53	0.49	-0.41	0.25	-0.22	0.16	-0.01	-0.03	-0.44	-0.06	-0.41	0.72	0.04	0.32	0.98	0.91	0.88	1						
CTCe	0.75	0.67	-0.64	0.12	-0.17	0.31	0.12	-0.32	-0.71	0.25	-0.12	0.84	0.01	0.44	0.98	0.97	0.97	0.93	1					
V%	0.53	0.43	-0.35	-0.01	-0.16	0.29	0.07	-0.04	-0.36	0.01	-0.29	0.48	-0.25	-0.01	0.67	0.67	0.85	0.64	0.71	1				
MOS	0.89	0.84	-0.88	0.01	-0.13	0.31	0.22	-0.59	-0.87	0.56	0.22	0.76	0.12	0.67	0.76	0.82	0.80	0.67	0.85	0.49	1			
c	0.94	0.86	-0.94	-0.14	-0.06	0.36	0.33	-0.64	-0.85	0.66	0.36	0.65	0.14	0.66	0.61	0.68	0.72	0.51	0.74	0.47	0.94	1		
D	-0.92	-0.72	0.83	0.29	-0.11	-0.51	-0.40	0.71	0.88	-0.58	-0.33	-0.66	-0.11	-0.64	-0.57	-0.66	-0.69	-0.46	-0.70	-0.47	-0.85	-0.92	1	
OF	0.39	0.62	-0.55	0.47	-0.34	-0.23	0.15	-0.26	-0.51	0.30	0.03	0.71	0.16	0.54	0.63	0.63	0.48	0.62	0.63	0.08	0.66	0.50	-0.41	1

C= estoque de C; A=altitude; TMa= temperatura média anual anual; TMx= temperatura média máxima; TMn= temperatura média mínima; PA=precipitação anual; UR= umidade relativa; Al= alumínio; m= saturação de alumínio; Clay= argila; P= fósforo; K= potássio; Ca= cálcio; %Ca= saturação de cálcio; Mg= magnésio; CTCn= CTC_{pH7,0}; CTCe= CTC_{efetiva}; V%= saturação de bases; MOS= matéria orgânica do solo; c= concentração de carbono; D= densidade; OF= óxidos de ferro.

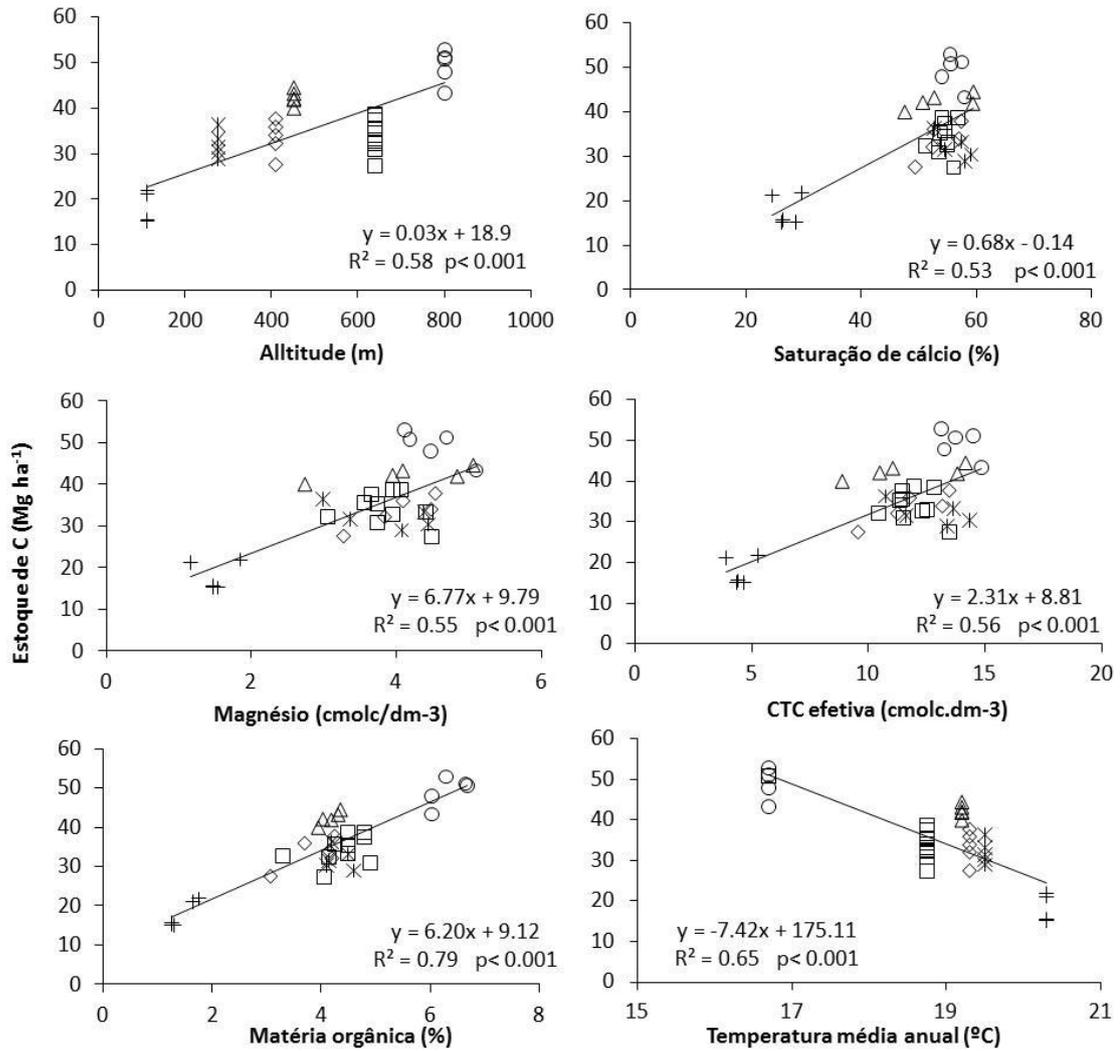


Figura 1 – Regressão entre atributos de determinantes no acúmulo de C da camada superficial (0-15 cm) em SPD de longa duração no Rio Grande do Sul. (○) Lagoa Vermelha; (□) Palmeira das Missões; (Δ) Cruz Alta; (◇) Fortaleza dos Valos; (*) Santa Rosa e (+) Manoel Viana.

Tabela 4 – Correlação entre variáveis para estoque de carbono no solo na camada de 0-15 cm em campo nativo no Rio Grande do Sul.

	C	A	TMa	TMx	TMn	PA	UR	pH	SMP	AL	M	Clay	P	K	Ca	%Ca	Mg	CTCn	CTCe	V%	MOS	c	D	OF
C	1																							
A	0.62	1																						
TMa	-0.76	-0.93	1																					
TMx	-0.05	0.19	0.09	1																				
TMn	0.12	-0.44	0.12	-0.90	1																			
PA	0.24	0.11	-0.32	-0.74	0.63	1																		
UR	0.21	0.18	-0.19	-0.45	0.37	0.11	1																	
pH	0.27	-0.44	0.17	-0.32	0.60	-0.04	0.07	1																
SMP	-0.49	-0.83	0.67	-0.32	0.48	-0.21	-0.09	0.65	1															
AL	-0.12	0.53	-0.20	0.63	-0.83	-0.29	-0.06	-0.85	-0.70	1														
m	-0.59	0.09	0.18	0.25	-0.49	0.03	-0.14	-0.89	-0.37	0.76	1													
Clay	0.69	0.51	-0.40	0.56	-0.40	-0.28	0.12	0.01	-0.58	0.32	-0.25	1												
P	-0.52	-0.58	0.63	0.05	0.08	-0.20	-0.11	0.21	0.47	-0.13	0.06	-0.24	1											
K	0.35	-0.40	0.18	-0.33	0.65	0.28	0.10	0.78	0.34	-0.69	-0.66	0.19	0.25	1										
Ca	0.90	0.30	-0.51	-0.21	0.40	0.35	0.21	0.49	-0.26	-0.41	-0.72	0.57	-0.34	0.64	1									
%Ca	0.96	0.45	-0.63	-0.10	0.25	0.27	0.21	0.40	-0.37	-0.28	-0.69	0.66	-0.42	0.51	0.98	1								
Mg	0.94	0.62	-0.80	-0.11	0.15	0.22	0.21	0.33	-0.38	-0.21	-0.67	0.59	-0.50	0.32	0.87	0.94	1							
CTCn	0.78	0.06	-0.32	-0.31	0.56	0.32	0.19	0.69	0.01	-0.62	-0.84	0.43	-0.20	0.79	0.96	0.90	0.78	1						
CTCe	0.96	0.52	-0.68	-0.09	0.20	0.28	0.22	0.34	-0.43	-0.21	-0.64	0.68	-0.43	0.47	0.96	0.99	0.95	0.87	1					
V%	0.57	0.23	-0.43	-0.06	0.13	-0.23	0.12	0.58	0.18	-0.46	-0.84	0.28	-0.24	0.20	0.52	0.59	0.73	0.57	0.57	1				
MOS	0.98	0.64	-0.78	-0.08	0.13	0.31	0.22	0.23	-0.53	-0.10	-0.55	0.68	-0.49	0.35	0.91	0.97	0.95	0.79	0.98	0.53	1			
c	0.99	0.67	-0.82	-0.08	0.11	0.27	0.22	0.24	-0.51	-0.11	-0.58	0.65	-0.53	0.31	0.89	0.95	0.97	0.76	0.97	0.60	0.99	1		
D	-0.79	-0.83	0.84	-0.07	0.15	-0.35	-0.17	0.23	0.83	-0.27	0.12	-0.64	0.56	-0.02	-0.66	-0.75	-0.77	-0.45	-0.79	-0.22	-0.85	-0.84	1	
OF	0.87	0.62	-0.60	0.36	-0.23	-0.07	0.17	0.09	-0.63	0.18	-0.39	0.94	-0.39	0.25	0.77	0.85	0.79	0.62	0.87	0.41	0.87	0.85	-0.80	1

C= estoque de C; A=altitude; TMa= temperatura média anual anual; TMx= temperatura média máxima; TMn= temperatura média mínima; PA=precipitação anual; UR= umidade relativa; Al= alumínio; m= saturação de alumínio; Clay= argila; P= fósforo; K= potássio; Ca= cálcio; %Ca= saturação de cálcio; Mg= magnésio; CTCn= CTCpH7,0; CTCe= CTCefetiva; V%= saturação de bases; MOS= matéria orgânica do solo; c= concentração de carbono; D= densidade; OF= óxidos de ferro.

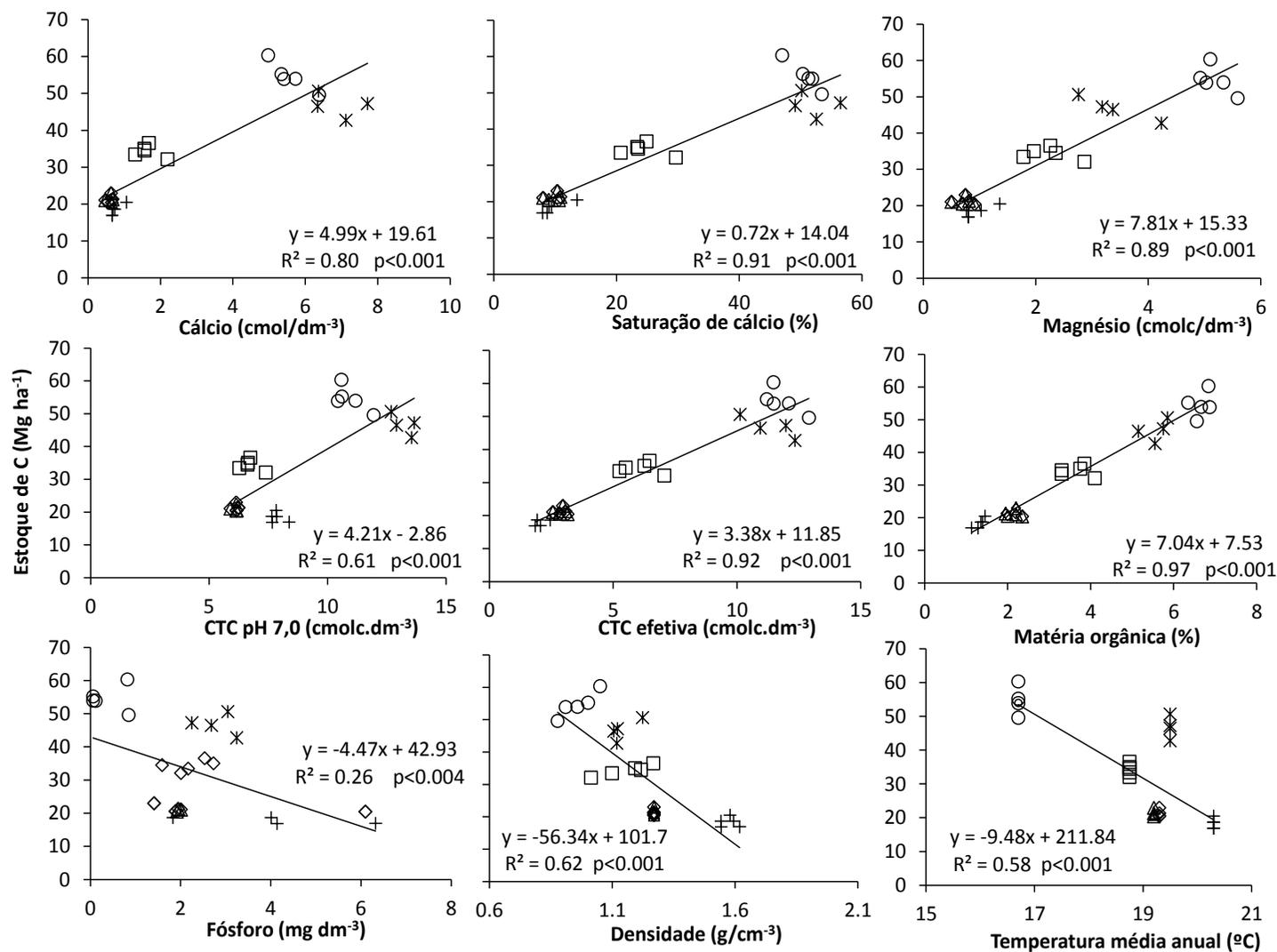


Figura 2 – Regressão entre atributos de determinantes no acúmulo de C da camada superficial (0-15 cm) em campo nativo. (○) Lagoa Vermelha; (□) Palmeira das Missões; (Δ) Cruz Alta; (◇) Fortaleza dos Valos; (*) Santa Rosa e (+) Manoel Viana.

3.5.3 Análise de componentes principais dos atributos de clima e solo na camada subsuperficial (60-100 cm)

3.5.3.1 Sistema plantio direto

Os atributos de clima, relevo, químicos e físicos do solo compuseram uma matriz com 24 variáveis originais. A partir desses dados originais foram obtidos 20 CPs na ACP. Destes, apenas 5 CPs apresentaram autovalores acima de um, acumulando 91,9% da variância total presente nos dados, porém, com apenas dois CPs acumularam-se 62,4 % da variância total (Tabela 5).

Dentre os cinco fatores agrupados, e o ajuste do modelo foi capaz de explicar 91,9% das variâncias das variáveis com autovalores maiores que 1 (Tabela 5). O primeiro componente explicou 34,1% da variabilidade total. Esse componente é constituído pelo estoque de C (0-5 cm), altitude, argila, CTC efetiva ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$), matéria orgânica (%) e carbono, na camada de 0,60-0,100 m, com escores positivos e altamente significativos. E temperatura média anual ($^{\circ}\text{C}$) e densidade (g cm^{-3}) com escores negativos e altamente significativos. Os componentes principais 1 e 2, juntos, explicaram 62,4% da variabilidade, com acréscimo de 28,3% na proporção acumulada, e pH, alumínio, saturação de alumínio, Cálcio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e CTC pH 7,0 ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$) na camada de 60-0,100 m, com escores de 0,90; -0,87; 0,76 e 0,88 selecionado dentro do segundo fator. A Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$) e precipitação anual com escores de -0,89; 0,87 e 0,90; respectivamente, selecionados dentro do terceiro fator.

Tabela 5 – Autovalores e variância acumulada obtidos na análise de componentes principais (ACP) a partir dos dados originais de sistema plantio direto (SPD).

Componentes da Variância		Componentes Principais (CPs)				
		1	2	3	4	5
Autovalores		8.20	6.79	4.28	1.70	1.09
Proporção (%)		34.16	28.29	17.83	7.09	4.54
Proporção Acumulada (%)		34.16	62.45	80.28	87.37	91.91

N	Variáveis	Correlação com os CPs					Contribuição aos CPs				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	Estoque de Carbono (0-5 cm)	0.90	-0.28	0.01	0.27	-0.08	0.10	0.01	0.00	0.04	0.01
2	Altitude	0.94	-0.05	-0.31	0.08	0.08	0.11	0.00	0.02	0.00	0.01
3	Temperatura média anual (°C)	-0.91	0.31	0.03	-0.04	-0.13	0.10	0.01	0.00	0.00	0.02
4	Temperatura máxima (°C)	0.09	0.36	-0.89	-0.19	-0.05	0.00	0.02	0.19	0.02	0.00
5	Temperatura mínima (°C)	-0.29	-0.27	0.87	-0.02	0.19	0.01	0.01	0.18	0.00	0.03
6	Precipitação anual	0.22	-0.19	0.90	-0.19	-0.20	0.01	0.01	0.19	0.02	0.04
7	Umidade relativa (%)	0.20	0.16	0.38	0.45	0.72	0.00	0.00	0.03	0.12	0.48
8	pH	0.25	0.90	-0.09	0.16	0.06	0.01	0.12	0.00	0.01	0.00
9	SMP	-0.65	0.68	-0.18	0.22	0.09	0.05	0.07	0.01	0.03	0.01
10	Alumínio	0.47	-0.87	0.01	-0.07	0.00	0.03	0.11	0.00	0.00	0.00
11	Saturação Al	0.08	-0.96	-0.16	-0.02	0.04	0.00	0.14	0.01	0.00	0.00
12	Argila (%)	0.81	0.34	-0.02	-0.37	-0.06	0.08	0.02	0.00	0.08	0.00
13	Fósforo (mg dm ⁻³)	-0.55	-0.17	0.29	0.49	-0.26	0.04	0.00	0.02	0.14	0.06
14	Potássio (cmol _c dm ⁻³)	-0.09	-0.66	0.14	0.02	-0.01	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00
15	Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	0.16	0.76	0.59	-0.16	-0.01	0.00	0.09	0.08	0.01	0.00
16	Saturação Ca	0.35	0.65	0.62	-0.22	-0.08	0.02	0.06	0.09	0.03	0.01
17	Magnésio	0.68	0.58	-0.11	0.35	-0.18	0.06	0.05	0.00	0.07	0.03
18	CTC pH 7,0 (cmol _c dm ⁻³)	-0.09	0.88	0.45	-0.06	0.02	0.00	0.11	0.05	0.00	0.00
19	CTC efetiva (cmol _c dm ⁻³)	0.82	0.30	0.42	0.01	-0.11	0.08	0.01	0.04	0.00	0.01
20	Saturação de Bases (%)	0.33	0.65	-0.45	0.41	-0.16	0.01	0.06	0.05	0.10	0.02
21	Matéria orgânica (%)	0.70	-0.35	0.29	0.47	0.01	0.06	0.02	0.02	0.13	0.00
22	Carbono (g kg)	0.94	-0.21	0.03	0.22	-0.11	0.11	0.01	0.00	0.03	0.01
23	Densidade g cm ⁻³	-0.85	0.04	-0.03	0.33	0.14	0.09	0.00	0.00	0.06	0.02
24	Óxido de ferro	0.57	0.18	-0.31	-0.38	0.52	0.04	0.00	0.02	0.08	0.25

(em negrito) Caracteres com maiores cargas fatoriais (scores) selecionadas dentro de cada fator.

3.5.3.2 Campo Nativo

Os atributos de clima, relevo, químicos e físicos do solo compuseram uma matriz com 24 variáveis originais. A partir desses dados originais foram obtidos 21 componentes principais (CPs) na ACP. Destes, apenas 5 CPs apresentaram autovalores acima de um, acumulando 91,1% da variância total presente nos dados, porém, com apenas dois CPs acumularam-se 64,1 % da variância total (Tabela 6).

Dentre os cinco fatores agrupados, e o ajuste do modelo foi capaz de explicar 91,1% das variâncias das variáveis com autovalores maiores que 1 (Tabela 6). O primeiro componente explicou 39,7% da variabilidade total. Esse componente é constituído pelo estoque de Carbono (0-5 cm), pH, argila, Cálcio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), Saturação Ca, magnésio, CTC pH 7,0 ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), Saturação de Bases (%), Matéria orgânica (%), carbono e Óxido de ferro na camada de 0,60-0,100 m, com escores positivos e altamente significativos. E saturação de alumínio com escore negativo e altamente significativo.

Os componentes principais 1 e 2, juntos, explicaram 64,1% da variabilidade, com acréscimo de 24,4% na proporção acumulada, e Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), SMP, na camada de 60-0,100 m, com escores de 0,74; -0,93; e -0,76 selecionados dentro do segundo fator. A precipitação anual e alumínio com escores de 0,83 e 0,84; respectivamente, selecionados dentro do terceiro fator.

Tabela 6 – Autovalores e variância acumulada obtidos na análise de componentes principais (ACP) a partir dos dados originais de campo nativo.

Componentes da Variância		Componentes Principais (CPs)				
		1	2	3	4	5
Autovalores		9.53	5.85	3.98	1.49	1.03
Proporção (%)		39.69	24.38	16.57	6.21	4.27
Proporção Acumulada (%)		39.69	64.07	80.64	86.85	91.13

N	Variáveis	Correlação com os CPs					Contribuição aos CPs				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	Estoque de Carbono (0-5 cm)	0.75	0.36	-0.19	0.06	-0.04	0.06	0.02	0.01	0.00	0.00
2	Altitude	0.45	0.65	0.56	0.20	-0.03	0.02	0.07	0.08	0.03	0.00
3	Temperatura média anual (°C)	-0.54	-0.36	-0.63	-0.32	0.13	0.03	0.02	0.10	0.07	0.02
4	Temperatura máxima (°C)	0.15	0.74	-0.50	-0.38	-0.13	0.00	0.09	0.06	0.10	0.02
5	Temperatura mínima (°C)	0.03	-0.93	0.22	0.21	0.11	0.00	0.15	0.01	0.03	0.01
6	Precipitação anual	0.00	-0.50	0.83	-0.11	-0.13	0.00	0.04	0.17	0.01	0.02
7	Umidade relativa (%)	0.20	-0.15	0.23	0.51	0.70	0.00	0.00	0.01	0.17	0.48
8	pH	0.71	-0.53	-0.15	0.14	-0.06	0.05	0.05	0.01	0.01	0.00
9	SMP	-0.20	-0.76	-0.58	0.12	0.00	0.00	0.10	0.08	0.01	0.00
10	Alumínio	-0.51	-0.06	0.84	0.04	-0.14	0.03	0.00	0.18	0.00	0.02
11	Saturação Al	-0.87	-0.04	0.32	0.25	-0.16	0.08	0.00	0.03	0.04	0.03
12	Argila (%)	0.81	0.53	0.14	0.06	0.03	0.07	0.05	0.00	0.00	0.00
13	Fósforo (mg dm ⁻³)	0.15	-0.45	-0.18	0.36	-0.55	0.00	0.03	0.01	0.09	0.30
14	Potássio (cmol _c dm ⁻³)	0.60	-0.56	0.01	0.13	-0.28	0.04	0.05	0.00	0.01	0.08
15	Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	0.80	-0.51	0.06	-0.29	0.05	0.07	0.04	0.00	0.06	0.00
16	Saturação Ca	0.87	-0.42	0.10	-0.21	0.04	0.08	0.03	0.00	0.03	0.00
17	Magnésio	0.84	-0.27	0.17	-0.06	0.01	0.07	0.01	0.01	0.00	0.00
18	CTC pH 7,0 (cmol _c dm ⁻³)	0.72	-0.64	-0.06	-0.24	0.04	0.05	0.07	0.00	0.04	0.00
19	CTC efetiva (cmol _c dm ⁻³)	0.64	-0.50	0.45	-0.32	0.02	0.04	0.04	0.05	0.07	0.00
20	Saturação de Bases (%)	0.83	0.20	-0.38	0.19	0.04	0.07	0.01	0.04	0.02	0.00
21	Matéria orgânica (%)	0.73	0.26	-0.21	0.49	-0.16	0.06	0.01	0.01	0.16	0.02
22	Carbono (g kg ⁻¹)	0.83	0.46	-0.10	0.05	-0.03	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00
23	Densidade g cm ⁻³	-0.18	-0.49	-0.73	0.25	0.05	0.00	0.04	0.13	0.04	0.00
24	Óxido de ferro	0.91	0.30	0.08	-0.05	0.03	0.09	0.02	0.00	0.00	0.00

(em negrito) Caracteres com maiores cargas fatoriais (scores) selecionadas dentro de cada fator.

3.5.4 Atributos determinantes no acúmulo de C da camada subsuperficial de SPD de longa duração e campo nativo

Os atributos que melhor se correlacionaram positivamente com o estoque de C na camada subsuperficial no SPD foram altitude, MOS (Tabela 7, Figura 3). A temperatura média anual se correlacionou negativamente com o estoque de C nessa camada (Figura 3).

Já no CN, os atributos que melhor se correlacionaram positivamente com o estoque de C foram argila, MOS e óxidos de ferro (Tabela 8, Figura 4). A saturação de alumínio se correlacionou negativamente com o estoque de C nessa camada.

Os maiores estoques de C foram encontrados no local de Lagoa Vermelha, variando de 65,4 a 67,0 Mg ha⁻¹, o que coincidiu com a maior altitude (801 m) e na menor temperatura média anual (16,7 °C). Já o menor estoque de C foi encontrado no local de Manoel Viana variando de 19,9 a 26,6 Mg ha⁻¹, o que coincidiu com a menor altitude (113 m) e na maior temperatura média anual (20,3 °C).

A variação média da argila foi de 51,0 a 69,70 cmol_c dm⁻³ para Latossolos argilosos e de 19,50 a 28,50 cmol_c dm⁻³ para o Neossolo Quartzarênico sob SPD (Figura 3). E variação média de 27,0 a 62,00 cmol_c dm⁻³ para Latossolos argilosos e de 66,0 a 2,46 cmol_c dm⁻³ para o Neossolo Quartzarênico sob campo nativo (Figura 4).

A variação média da saturação de alumínio a CTCpH7,0 foi de 5,80 a 46,84% para Latossolos argilosos e de 0,0 a 11,82% para o Neossolo Quartzarênico sob SPD (Figura 3). E variação média de 4,01 a 51,5% sob campo nativo (Figura 4).

Considerando o SPD, a saturação de alumínio mais elevada ocorreu no Latossolo argiloso de Lagoa Vermelha, variando de 35,3 a 46,8%.

Tabela 7 – Correlação entre variáveis para estoque de carbono no solo na camada de 60-100 cm em SPD no Rio Grande do Sul.

	C	A	TMa	TMx	TMn	PA	UR	pH	SMP	AL	M	Clay	P	K	Ca	%Ca	Mg	CTCn	CTCe	V%	MOS	c	D	OF
C	1																							
A	0.87	1																						
TMa	-0.91	-0.90	1																					
TMx	-0.09	0.33	0.03	1																				
TMn	-0.20	-0.53	0.15	-0.93	1																			
PA	0.24	-0.10	-0.21	-0.83	0.76	1																		
UR	0.21	0.15	-0.18	-0.38	0.32	0.12	1																	
pH	0.00	0.25	-0.01	0.39	-0.38	-0.23	0.23	1																
SMP	-0.73	-0.56	0.75	0.30	-0.12	-0.49	0.05	0.53	1															
AL	0.64	0.48	-0.70	-0.25	0.10	0.27	-0.08	-0.66	-0.91	1														
m	0.33	0.17	-0.37	-0.18	0.09	0.04	-0.17	-0.82	-0.68	0.89	1													
Clay	0.56	0.72	-0.57	0.28	-0.38	0.20	0.06	0.40	-0.41	0.11	-0.25	1												
P	-0.31	-0.56	0.43	-0.40	0.39	0.07	-0.01	-0.24	0.30	-0.11	0.08	-0.68	1											
K	0.05	-0.09	-0.18	-0.35	0.35	0.19	-0.16	-0.55	-0.37	0.52	0.54	-0.42	0.20	1										
Ca	-0.11	-0.08	0.12	-0.19	0.25	0.43	0.30	0.64	0.27	-0.56	-0.80	0.43	-0.09	-0.41	1									
%Ca	0.08	0.08	-0.08	-0.22	0.24	0.55	0.25	0.57	0.04	-0.38	-0.70	0.58	-0.20	-0.35	0.97	1								
Mg	0.55	0.64	-0.44	0.31	-0.48	-0.09	0.19	0.75	0.04	-0.21	-0.51	0.59	-0.31	-0.37	0.43	0.48	1							
CTCn	-0.35	-0.26	0.36	-0.06	0.18	0.20	0.27	0.72	0.57	-0.78	-0.91	0.22	0.03	-0.46	0.94	0.84	0.38	1						
CTCe	0.66	0.61	-0.63	-0.16	0.02	0.49	0.28	0.44	-0.40	0.15	-0.28	0.73	-0.31	-0.15	0.64	0.76	0.73	0.40	1					
V%	0.23	0.42	-0.12	0.56	-0.67	-0.47	0.06	0.74	0.39	-0.46	-0.58	0.34	-0.24	-0.45	0.19	0.17	0.85	0.29	0.28	1				
MOS	0.85	0.61	-0.75	-0.40	0.12	0.38	0.40	-0.09	-0.65	0.60	0.34	0.25	-0.05	0.23	-0.04	0.10	0.39	-0.26	0.60	0.04	1			
c	0.99	0.89	-0.90	-0.06	-0.23	0.26	0.20	0.07	-0.72	0.60	0.26	0.63	-0.36	0.01	-0.02	0.17	0.59	-0.27	0.72	0.26	0.83	1		
D	-0.68	-0.75	0.76	-0.12	0.22	-0.28	0.07	-0.14	0.64	-0.45	-0.10	-0.76	0.49	0.01	-0.18	-0.37	-0.46	0.07	-0.71	-0.13	-0.45	-0.73	1	
OF	0.29	0.64	-0.58	0.46	-0.35	-0.24	0.15	0.33	-0.19	0.16	-0.06	0.57	-0.63	-0.10	0.11	0.17	0.33	0.02	0.37	0.21	0.07	0.31	-0.55	1

C= estoque de C; A=altitude; TMa= temperatura média anual anual; TMx= temperatura média máxima; TMn= temperatura média mínima; PA=precipitação anual; UR= umidade relativa; Al= alumínio; m= saturação de alumínio; Clay= argila; P= fósforo; K= potássio; Ca= cálcio; %Ca= saturação de cálcio; Mg= magnésio; CTCn= CTC_{pH7,0}; CTCe= CTC_{efetiva}; V%= saturação de bases; MOS= matéria orgânica do solo; c= concentração de carbono; D= densidade; OF= óxidos de ferro.

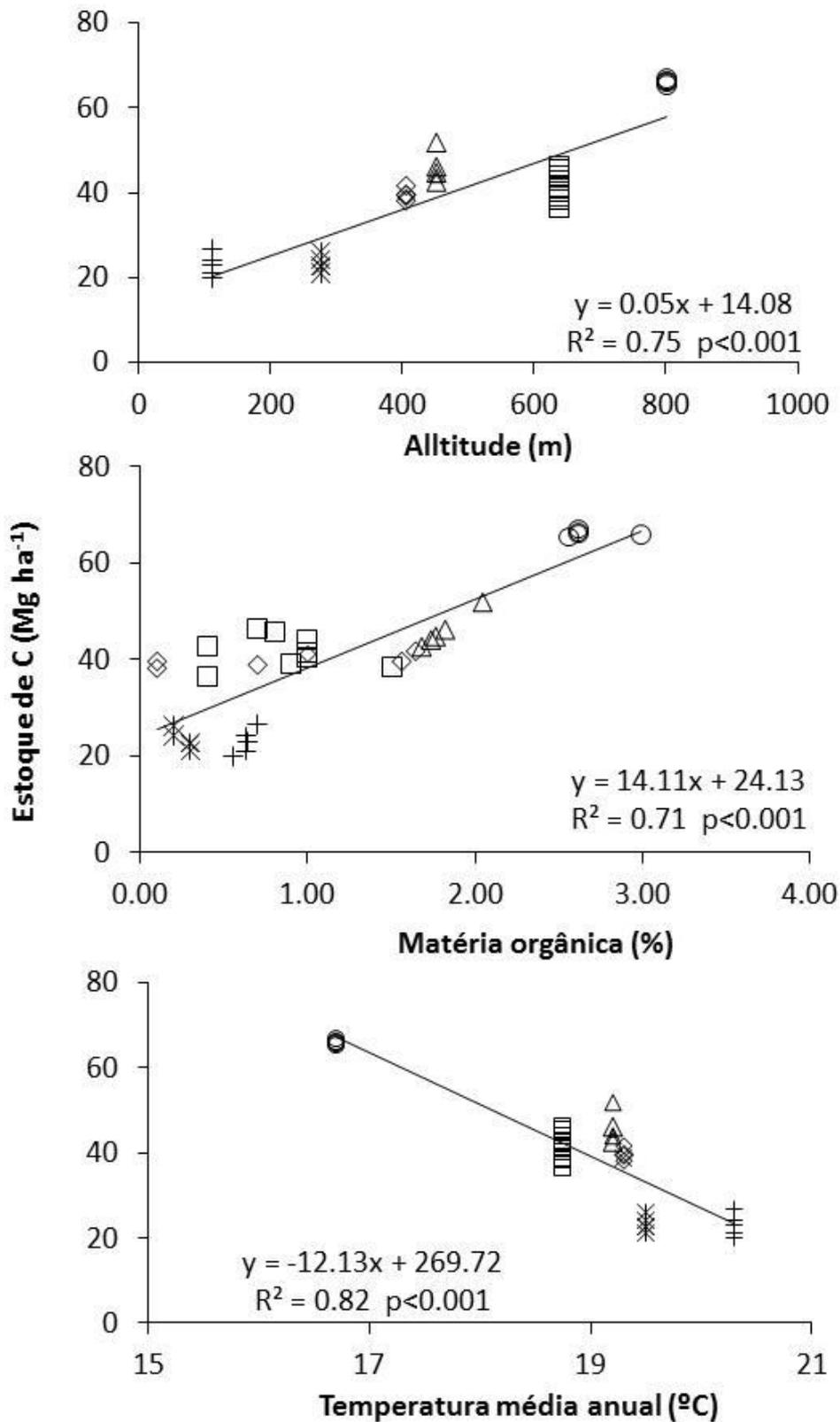


Figura 3 – Regressão entre atributos de determinantes no acúmulo de C da camada subsuperficial (60-100 cm) em SPD de longa duração no Rio Grande do Sul. (○) Lagoa Vermelha; (□) Palmeira das Missões; (Δ) Cruz Alta; (◇) Fortaleza dos Valos; (*) Santa Rosa e (+) Manoel Viana.

Tabela 8 – Correlação entre variáveis para estoque de carbono no solo na camada de 60-100 cm em campo nativo no Rio Grande do Sul.

	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>TMa</i>	<i>TMx</i>	<i>TMn</i>	<i>PA</i>	<i>UR</i>	<i>pH</i>	<i>SMP</i>	<i>AL</i>	<i>m</i>	<i>Clay</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>%Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>CTCn</i>	<i>CTCe</i>	<i>V%</i>	<i>MOS</i>	<i>c</i>	<i>D</i>	<i>OF</i>
<i>C</i>	1																							
<i>A</i>	0.42	1.00																						
<i>TMa</i>	-0.36	-0.93	1.00																					
<i>TMx</i>	0.43	0.19	0.09	1.00																				
<i>TMn</i>	-0.32	-0.44	0.12	-0.90	1.00																			
<i>PA</i>	-0.28	0.11	-0.32	-0.74	0.63	1.00																		
<i>UR</i>	0.10	0.18	-0.19	-0.45	0.37	0.11	1.00																	
<i>pH</i>	0.29	-0.07	-0.19	-0.25	0.53	0.15	0.16	1.00																
<i>SMP</i>	-0.34	-0.87	0.67	-0.36	0.61	-0.11	-0.05	0.40	1.00															
<i>AL</i>	-0.55	0.22	-0.28	-0.55	0.22	0.73	-0.01	-0.44	-0.32	1.00														
<i>m</i>	-0.70	-0.19	0.18	-0.39	0.12	0.27	-0.12	-0.57	0.06	0.76	1.00													
<i>Clay</i>	0.74	0.80	-0.74	0.42	-0.42	-0.16	0.15	0.32	-0.64	-0.32	-0.66	1.00												
<i>P</i>	0.00	-0.24	0.09	-0.24	0.35	0.06	0.03	0.36	0.38	-0.14	-0.03	-0.15	1.00											
<i>K</i>	0.36	-0.09	-0.14	-0.34	0.56	0.36	0.14	0.76	0.29	-0.25	-0.45	0.18	0.50	1.00										
<i>Ca</i>	0.40	0.00	-0.18	-0.18	0.45	0.31	0.16	0.77	0.15	-0.34	-0.73	0.37	0.23	0.69	1.00									
<i>%Ca</i>	0.47	0.14	-0.32	-0.16	0.40	0.30	0.18	0.79	0.07	-0.35	-0.77	0.50	0.20	0.70	0.98	1.00								
<i>Mg</i>	0.41	0.33	-0.51	-0.15	0.27	0.22	0.17	0.64	-0.04	-0.25	-0.67	0.53	0.20	0.48	0.85	0.89	1.00							
<i>CTCn</i>	0.31	-0.18	-0.03	-0.25	0.56	0.28	0.14	0.81	0.35	-0.39	-0.68	0.22	0.31	0.73	0.98	0.95	0.79	1.00						
<i>CTCe</i>	0.19	0.16	-0.35	-0.38	0.50	0.62	0.16	0.55	-0.05	0.08	-0.48	0.27	0.14	0.56	0.89	0.88	0.84	0.84	1.00					
<i>V%</i>	0.65	0.36	-0.39	0.38	-0.22	-0.47	0.12	0.58	-0.05	-0.74	-0.81	0.74	0.13	0.30	0.48	0.57	0.66	0.44	0.22	1.00				
<i>MOS</i>	0.73	0.49	-0.56	0.21	-0.17	-0.33	0.12	0.47	-0.13	-0.48	-0.54	0.70	0.18	0.36	0.29	0.40	0.53	0.25	0.11	0.83	1.00			
<i>c</i>	0.95	0.60	-0.52	0.49	-0.40	-0.28	0.12	0.33	-0.47	-0.53	-0.76	0.89	-0.02	0.33	0.42	0.51	0.49	0.30	0.23	0.76	0.78	1.00		
<i>D</i>	-0.16	-0.74	0.59	-0.15	0.36	-0.39	-0.07	0.27	0.89	-0.44	0.03	-0.48	0.26	0.10	-0.01	-0.06	-0.09	0.17	-0.26	0.11	0.07	-0.33	1.00	
<i>OF</i>	0.74	0.64	-0.63	0.35	-0.23	-0.07	0.17	0.54	-0.47	-0.43	-0.80	0.95	-0.04	0.39	0.59	0.69	0.64	0.46	0.45	0.77	0.64	0.88	-0.41	1

C= estoque de C; *A*=altitude; *TMa*= temperatura média anual anual; *TMx*= temperatura média máxima; *TMn*= temperatura média mínima; *PA*=precipitação anual; *UR*= umidade relativa; *Al*= alumínio; *m*= saturação de alumínio; *Clay*= argila; *P*= fósforo; *K*= potássio; *Ca*= cálcio; *%Ca*= saturação de cálcio; *Mg*= magnésio; *CTCn*= $CTC_{pH7,0}$; *CTCe*= $CTC_{efetiva}$; *V%*= saturação de bases; *MOS*= matéria orgânica do solo; *c*= concentração de carbono; *D*= densidade; *OF*= óxidos de ferro.

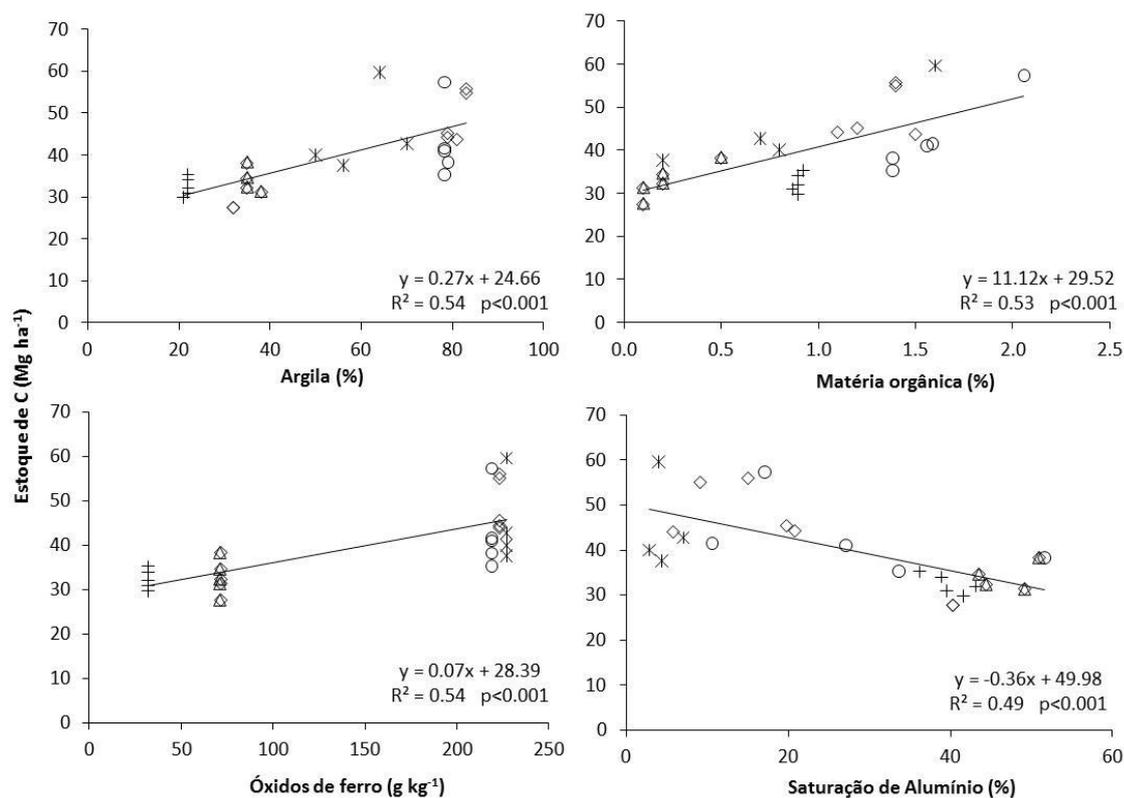


Figura 4 – Regressão entre atributos de determinantes no acúmulo de C da camada subsuperficial (60-100 cm) em campo nativo. (○) Lagoa Vermelha; (□) Palmeira das Missões; (Δ) Cruz Alta; (◇) Fortaleza dos Valos; (*) Santa Rosa e (+) Manoel Viana.

3.6 CONCLUSÕES

Os fatores que determinaram o acúmulo de C foram diferentes na condição da camada subsuperficial (60-100 cm) em relação à camada superficial (0-15 cm).

Na camada superficial (0-15 cm), a saturação de cálcio, magnésio, CTC efetiva e MOS foram fatores correlacionados positivamente com o estoque de C tanto em SPD como em CN. Enquanto, que a temperatura média anual e densidade do solo se correlacionaram negativamente com o estoque de C no SPD e no CN nessa mesma camada.

Na camada subsuperficial (60-100 cm) os atributos que melhor se correlacionaram positivamente com o estoque de C no SPD foram altitude e MOS no SPD, e a argila, MOS e óxidos de ferro no CN. Enquanto, que a temperatura média anual e a saturação de alumínio se correlacionaram negativamente com o estoque de C no SPD e CN, respectivamente.

A maior altitude (801 m) e a menor temperatura média anual (16,7 °C) favoreceram o acúmulo de estoques de C superficial (0-15 cm) e subsuperficial (60-100 cm) no SPD. Sendo, que a mudança de temperatura média anual no horizonte subsuperficial teve correlação mais

sensível com o estoque de C ($R^2 = -0,91$) em relação ao horizonte superficial ($R^2 = -0,81$). Isso se deve a mineralização do C ser mais afetado nesse ambiente. A mudança de altitude no horizonte subsuperficial também teve correlação mais sensível com o estoque de C ($R^2 = 0,87$) em relação ao horizonte superficial ($R^2 = 0,77$).

O aumento de estoque de C na camada superficial (0-15 cm) acompanhado do aumento da saturação de Ca constitui-se em uma prática que, além de promover a melhoria da fertilidade do solo, ocasiona também positivo impacto ambiental por atuar no dreno de C no solo.

3.7 REFERÊNCIAS

BAKER, J. M.; OCHSNER, T. E.; VENTEREA, R. T.; GRIFFIS, T. J. Tillage and carbon sequestration – What do we really know? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 118, n. 1, p. 1–4, 2007.

BAYER, C. Potencial de sistemas de manejo no sequestro de carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa em ambientes subtropicais. In: Anais do XIX Congresso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo - Latinoamérica unida protegiendo sus suelos, Mar del Plata, pág. 1-9, 2012.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: an on-farm assessment. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 3, p. 693–701, 2008.

BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; SANTOS, H. P.; DENARDIN, J. E.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; ALVES, B. J. R. & URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, v. 16, n. 2, p. 784–795, 2010.

BRIEDIS, C.; SA, J. C. M. ; CARLI, R. S.; ANTUNES, E. A. P.; Simon, L.; ROMKO, M.L.; ELIAS, L.S.; FERREIRA, A.O. Particulate soil organic carbon and stratification ratio increases in response to crop residue decomposition under no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1483-1490, 2012.

CHABBI, A.; KÖGEL-KNABNER, I.; RUMPEL, C. Stabilised carbon in subsoil horizons is located in spatially distinct parts of the soil profile. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 2, p. 256–271, 2009.

DAVY, M. C.; KOEN, T. B. Variations in soil organic carbon for two soil types and six land uses in the Murray Catchment, New South Wales, Australia. **Soil Research**, v. 51, n. 8, p. 631-644, 2013.

DICK, D. P. Sequestro de C e composição química da matéria orgânica do solo em ambientes subtropicais. In: Anais do X Encontro Brasileiro de Substâncias Húmicas. Santo Antônio de Goiás, Goiás, 2013a.

DICK, D. P.; REIS, C. S.; BAYER, C.; CALDAS, J. S. Carbon Sequestration in Subtropical Oxisol Profiles: Retention Capacity and Effect of Soil Management. In: Jianming Xu; Jianjun Wu; Yan He (Eds.). *Functions of Natural Organic Matter in Changing Environment*, pp 353-358, 2013b.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P. & KOGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil and Tillage Research**, v. 81, n. 1, p. 87-95, 2005.

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

FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M.; HARMS, M. G.; MIARA, S.; BRIEDIS, C.; QUADROS NETTO, C.; SANTOS, J.B.; CANALLI, L.B.S.; DIAS, C.T.S. Relação de estratificação como indicador do sequestro de carbono em macroagregados de Latossolo sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 42, n. 4, p. 645-652, 2012.

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

FERREIRA, A. O.; AMADO, T. J. C.; DALLA NORA, D.; KELLER, C.; BORTOLOTTI, R. P. Mudança no conteúdo de carbono e cálcio em Latossolo melhorado por gesso e calcário no Rio Grande do Sul. **Ciencia del Suelo**, v. 31, n. 1, p. 1-13, 2013b.

FIERER N.; ALLEN A. S.; SCHIMEL J. P.; HOLDEN P. A. Controls on microbial CO₂ production: a comparison of surface and subsurface soil horizons. **Global Change Biology**, v. 9, n. 9, p. 1322–1332, 2013.

MCLEOD, M.; SCHWENKE, G.; COWIE, A.; HARDEN, S. Soil carbon is only higher in the surface soil under minimum tillage in Vertosols and Chromosols of NSW North-West Slopes and Plains, Australia. **Soil Research**, v. 51, n. 8, p. 680-694, 2013.

NICOLOSO, R. S. Mecanismos de estabilização do carbono orgânico do solo em agroecossistemas de clima temperado e sub-tropical. 2009, 108f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

PIVA, J. T.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; DE MORAES, A.; PAULETTI, V.; TOMAZI, M.; PERGHER, M. No-till reduces global warming potential in a subtropical Ferralsol. **Plant and Soil**, v. 361, n. 1-2, p. 359-373, 2012.

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**, v. 73, n. 1, p. 255–261, 2009.

REIS, C. E. S. Estoque e qualidade da matéria orgânica e retenção de carbono em perfis de dois Latossolos subtropicais sob diferentes sistemas de manejo. 2012, 131f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RUMPEL, C. & KOGEL-KNABNER, I. Deep soil organic matter-a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. **Plant and Soil**, v. 338, n. 1-2, p. 143-158, 2011.

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**, v. 65, n. 5, p. 1486-1499, 2001.

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 and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 46-56, 2009a.

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

SALL, J.; CREIGHTON, L.; LEHMAN, A. **JMP start statistics: a guide to statistics and data analysis using JMP and JMP IN software**. 3rd ed. Cary: Duxbury Press, 2005. 580p.
SALL, John et al. **JMP start statistics: a guide to statistics and data analysis using JMP**. SAS Institute Inc., 2012.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.

SOARES, M. R.; ALLEONI, L. R. F. Contribution of soil organic carbon to the ion exchange capacity of tropical soils. **Journal of Sustainable Agriculture**, v. 32, n. 3, p. 439-462, 2008.

TIVET, F.; SÁ, J. C. M.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; BORSZOWSKEI, P.R.; BURKNER, J. D. S.; FARIAS, A.; EURICH, G.; HARTMAN, D. D. C.; NADOLNY, M. J.; BOUZINAC, S. L. S. Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 126, p. 203-218, 2013.

VON LÜTZOW M.; KÖGEL-KNABNER I.; EKSCHMITT K.; MATZNER E.; GUGGENBERGER G.; MARSCHNER B.; FLESSA H. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions-a review. **European Journal of Soil Science**, v. 57, n. 4, p. 426-445, 2006.

4 CAPÍTULO III – SOIL CARBON STRATIFICATION AFFECTED BY LONG-TERM TILLAGE AND CROPPING SYSTEMS IN SOUTHERN BRAZIL²

4.1 Abstract

Continuous residue inputs when associated with minimum soil disturbance gradually promote the stratification of soil organic carbon (SOC) in the soil profile. In temperate soils, this characteristic has been used as an indicator of quality of soil management. However, few studies have been conducted with this indicator in tropical and subtropical climates or with the main soil orders in these areas. To fill this gap, this study was carried out in a subtropical climate with two of the major Brazilian soil orders, Oxisol and Alfisol, that together account for 63% of Brazilian agricultural soils. This study tested the hypothesis that the CSR is affected by soil order and climate type. The main treatments were soil tillage and different cropping systems in two long-term experiments carried out in the State of Rio Grande do Sul, Brazil. The first experiment, established in 1985, was conducted over a clayey Hapludox (Oxisol) soil. The main plots were treated with one of two tillage systems (conventional tillage – CT; and no-tillage – NT). The subplots were treated with one of three cropping systems: a) continuous crop succession (R0) - wheat (*Triticum aestivum* L.)/soybean (*Glycine max* L Merrill); b) winter crop rotation (R1) – wheat/soybean/black oat (*Avena strigosa* Schreber)/soybean; c) summer and winter crop rotation (R2) - wheat/soybean/black oat/soybean/black oat + common vetch (*Vicia sativa* L. Walp)/maize (*Zea mays* L.)/forage radish (*Raphanus sativus* var. *oleiferus* Metzg.). The second experiment was established in 1991 over a sandy loam dystrophic Paleudalf (Alfisol) soil. Five cropping systems were analyzed under no-till: a) maize + jack beans (*Canavalia ensiformis* DC)/soybean (M/JP); b) maize/fallow/soybean(M/F); c) maize/ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) + common vetch/soybean (M/R); d) maize + velvet beans (*Stizolobium cinereum* Piper and Tracy)/soybean (M/VB); and e) maize/radish oil/soybean (M/FR). The carbon stratification ratio (CSR) was assessed in the 19th and 22nd experimental years for Oxisol and in the 10th and 17th years for Alfisol. This index was calculated through the ratio of SOC stocks in the 0-0.05 and 0.05-0.15 m soil layers. The CPI was determined through the ratio of SOC stocks in the 0-0.15 m soil layer in a given treatment compared with native vegetation. Regardless of the soil order, SOC was influenced by C input and the tillage system; there was a positive linear relationship between CSR and CPI. The relationship between the CSR and the carbon pool index (CPI) was used to infer the quality of soil management. Higher CSR and CPI indices were found under treatments with minimum soil disturbance and intensive crop rotation. Lower CSR and CPI values were associated with frequent mobilization and lower crop diversity. These CSR indices sensitively distinguished the intensity of tillage (NT replacing CT) and cropping systems (cover crops replacing winter fallow or crop succession). The CSR values in subtropical soils investigated were lower than those reported for temperate soils. The soil order affected the critical CSR value being lower in the Oxisol than in the Alfisol. Our findings recommend accept our hypothesis that the CSR is affected by climate and soil order.

Keywords: No-till. Conventional tillage. Cover crops. Soil organic matter.

²Artigo elaborado de acordo com as normas da revista Soil & Tillage Research (publicado, v. 133, p. 65-74, 2013 - <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2013.05.011>).

4.2 Introduction

The topsoil layer of croplands mediates energy flux, water partition and nutrient cycling; concentrates most biological activity; and regulates gas exchange between the soil and the atmosphere. Therefore, the topsoil layer plays a crucial role in ecosystem productivity and environmental quality (Franzluebbers, 2002; Sá and Lal, 2009). These processes are regulated by the concentration of SOC in the shallow topsoil, which is one of the most important indicators of soil quality in the agroecosystem (Doran and Parkin, 1994; Islam and Weil, 2000; Conceição et al., 2005). Yet, concentration of SOC in the shallow topsoil improves crucial hydraulic properties, such as water infiltration, soil water storage capacity and pore stability; besides related properties as soil aggregation, and resistance to soil compaction (Franzluebbers, 2002; Conceição et al., 2005; Moreno et al., 2006; Causarano et al., 2008; Tivet et al., 2013).

In natural ecosystems, the concentration of soil organic carbon (SOC) generally decreases from the topsoil to subsoil layers. This process is related to the continuous aboveground carbon (C) input by crop residues and animal excrement and the lack of soil disturbance (Prescott et al., 1995). In these ecosystems, the movement of C in the soil profile is promoted by bioturbation (Gabet et al. 2003; Jimenez and Lal, 2006; White and Rice, 2009), leaching of dissolved C (Neff and Asner, 2001), and direct C input by root systems (Santos et al., 2011). Long-term no-till (NT) systems also gradually promote SOC stratification between the topsoil and subsoil soil layers (Franzluebbers, 2002; Sá and Lal, 2009; Ferreira et al., 2012). In contrast, conventional tillage (CT) promotes the frequent inversion of soil layers and a more uniform C distribution through the soil profile (Angers et al., 1995; Hernanz et al., 2002). Some studies have noted an increase in SOC stocks in subsoil layers where crop residues were mechanically mixed in relation to NT (Baker et al., 2006; Blanco-Canqui and Lal, 2008; Olchin et al., 2008).

NT is a C-conservative system because it reduces biological SOC oxidation, decreases soil temperature, increases water content of soil, slows the turnover of macroaggregates and prevents erosion (Golchin et al., 1994; Jastrow et al., 1996; Six et al., 2000; Pês et al., 2011). The continued deposition of organic residues on the soil surface combined with minimum soil disturbance enhances biological activities that stimulate bio-physico-chemical C stabilization. This enhancement explains partially the SOC gains under NT in comparison with CT (Golchin et al., 1994; Six et al., 1998; Amado et al. 2006; Razafimbelo et al., 2008; Stewart et al., 2009).

Several indicators have been proposed for the evaluation of soil quality (Doran and Parkin, 1994; Karlen et al., 1994; Blair et al., 1995; Vezzani & Mielniczuk, 2009). Among them, the carbon pool index (CPI) relates the SOC stock in a soil under agricultural practices to the stock from a reference usually under natural vegetation (Blair et al., 1995). This index is also an efficient indicator quality of soil management in tropical climates (Vieira et al. 2007; Bayer et al. 2009; Campos et al. 2011) and temperate climates (Blair et al., 1995; Shang and Tiessen 1997).

The carbon stratification ratio (CSR) is the ratio between the SOC stocks from two distinct soil layers. Usually, the first layer is the topsoil, which is strongly influenced by quality of soil management (tillage and cropping system). The second is a subsoil layer, which is less affected by these farming operations (Franzluebbers, 2002). Higher CSR values indicate that soil management adopted enhance soil quality (Franzluebbers, 2002, 2010; Sá and Lal, 2009; Ferreira et al., 2012).

The time of adoption of soil management practices also affects the CSR. A study carried out in Southeast USA showed that the CSR increased from 2.4 to 3.1 after 5 years of conversion from CT to NT; the CSR reached 3.6 after 12 years (Franzluebbers, 2010). Several studies note that a CSR value of 2.0 is critical for maintaining soil quality in temperate climates (Franzluebbers, 2002).

Long-term studies addressing the CSR and its relation to soil quality in tropical and subtropical soils are scarce. This study tested the hypothesis that CSR is affected by soil order and climate type. The CPI index could be an efficient tool to establish the critical CSR value. We predict that critical CSR values for temperate soils cannot be directly applied to tropical and subtropical soils.

4.3 Materials and methods

4.3.1 Description of the experimental areas

This study consisted of two long-term experiments in southern Brazil. The first experiment was established in Cruz Alta in the State of Rio Grande do Sul, Brazil (28°33'S 53°40'W, 409 m of altitude). The local climate is subtropical humid (Cfa 2a according to Koppen's classification) with an mean annual rainfall and an annual temperature of 1,774 mm and 19.2°C, respectively. The highest mean monthly temperature (30.0°C) is recorded in January, and the lowest mean monthly temperature (8.5°C) is recorded in June

(Maluf, 2000). The soil is distroferric Hapludox (referred in this text as Oxisol) with a slope of 4.7% and a predominance of kaolinite and iron oxides (63.5 g kg^{-1}) (Campos et al., 2011).

The second experiment was established in 1991 in Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil ($29^{\circ}43'S$ $53^{\circ}42'W$, 86 m of altitude). The local climate is subtropical (Cfa in the Koppen's classification) with a mean annual rainfall and an annual temperature of 1,769 mm and 19.3°C , respectively (Maluf, 2000). The highest mean monthly temperature (30.4°C) is recorded in January, and the lowest mean monthly temperature (9.3°C) is recorded in June (Maluf, 2000). The soil is dystrophic Paluedalf (referred in this text as Alfisol) with a slope of 5.5%, a moderate A horizon, and a clay loam texture. Further soil characteristics are presented in Table 1.

Table 1 – Main soil characteristics by the establishment of the experiments.

Location	Soil	Layer	C ⁽¹⁾	pH	Phosphorus	Potassium	Sand	Silt	Clay
		m	g kg ⁻¹	H ₂ O	mg dm ⁻³		g kg ⁻¹		
Cruz Alta, RS, Brazil	Oxisol	0- 0.20	19.0	4.5	19	82	310	120	570
Santa Maria, RS, Brazil	Alfisol	0- 0.20	14.2	4.5	1.8	33	660	253	87

⁽¹⁾ Source: Adapted from Fabrizzi (2006); Campos (2006); Amado et al. (2006) and Lanzasova et al. (2010). C= Carbon.

The long-term experiment at the Oxisol site had a split-plot design with two tillage systems in the main plots (i.e., CT and NT) and three cropping systems in subplots without replications. These subplot treatments were as follows: a) continuous crop succession (R0) - wheat/soybean; b) winter crop rotation (R1) – wheat/soybean/black oat/soybean; c) summer and winter crop rotation (R2) - wheat/soybean/black oat/soybean/black oat + common vetch/maize/forage radish. Detailed information regarding the temporal cropping system is shown in Fig. 1. Table 2 shows the cultivars used in this study. The CT system consisted of a disk plow with 5 disks of 38.1 cm working at a 0.20-m depth and a disk tandem with 20 disks of 30.5 cm working at a 0.15-m depth. The CT system was tilled twice a year, in the autumn and spring seasons. NT maintains crop residues on the soil surface and promotes minimum soil disturbance; soil mobilization is restricted to the sowing row. The natural vegetation was pine forest with predominance of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze and natural pastures

consisted of *Paspalum notatum* Fluegge. In the end of 1950s there was a land use change with the conversion of this natural vegetation to agricultural fields with wheat and later soybean.

The cover crop C and N inputs were measured through a square wooden frame of 1 m² when plants were at full flowering stage. All of the aboveground biomass was collected and air-dried. For cash crops, the C input was measured over three years (1998-2000) through the previous method. These data were used to generate a correlation between the C input measurement and the C input estimated based on the harvest index (Y (harvest C index) = $-0.1372 + 1.074$ (C residue input); $R^2 = 0.89^{**}$). Grain harvest indexes of 0.35 for soybean and 0.40 for wheat and maize were used for the entire experimental period. The N content used to obtain plant N input was determined through micro-Kjeldahl method (Jackson, 1962).

Table 2 – Description of cultivars adopted.

Soil	Culture	2001/2002	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008	
Alfisol	Soybean	Cultivar	Cultivar	Cultivar	Cultivar	Cultivar AL72	Cultivar	Cultivar	
		AL72	AL72	AL72	AL72	AL72	AL72	AL72	
	Maize	Pioneer	Pioneer	Pioneer	Pioneer	Pioneer	Pioneer 3069	Pioneer	Pioneer
		3069	3069	3069	3069	3069	3069	3069	3069
	Jack bean	Common seed ¹	Common seed	Common seed	Common seed	Common seed	Common seed	Common seed	
Velvet bean	Common seed	Common seed	Common seed	Common seed	Common seed	Common seed	Common seed		
Forage radish	Cati 1000	AL-Cati 1000	AL-Cati 1000	AL-Cati 1000	AL-Cati 1000	Cati AL-1000	AL-Cati 1000	AL-Cati 1000	
Oxisol	Soybean	-----	-----	-----	A 6001 RG	Fundacep 39	Fundacep 54RR	Fundacep 59RR	
	Maize	-----	-----	-----	Fundacep 35	Fundacep 35	Fundacep 35	Fundacep 35	
	Wheat	-----	-----	-----	Fundacep 40	Fundacep Nova Era	Fundacep 52	Fundacep Raizes	
	Black oat	-----	-----	-----	Common seed	Common seed	Common seed	Common seed	
	forage radish	-----	-----	-----	Common seed	Common seed	Common seed	Common seed	

¹ Non-pedigreed seed

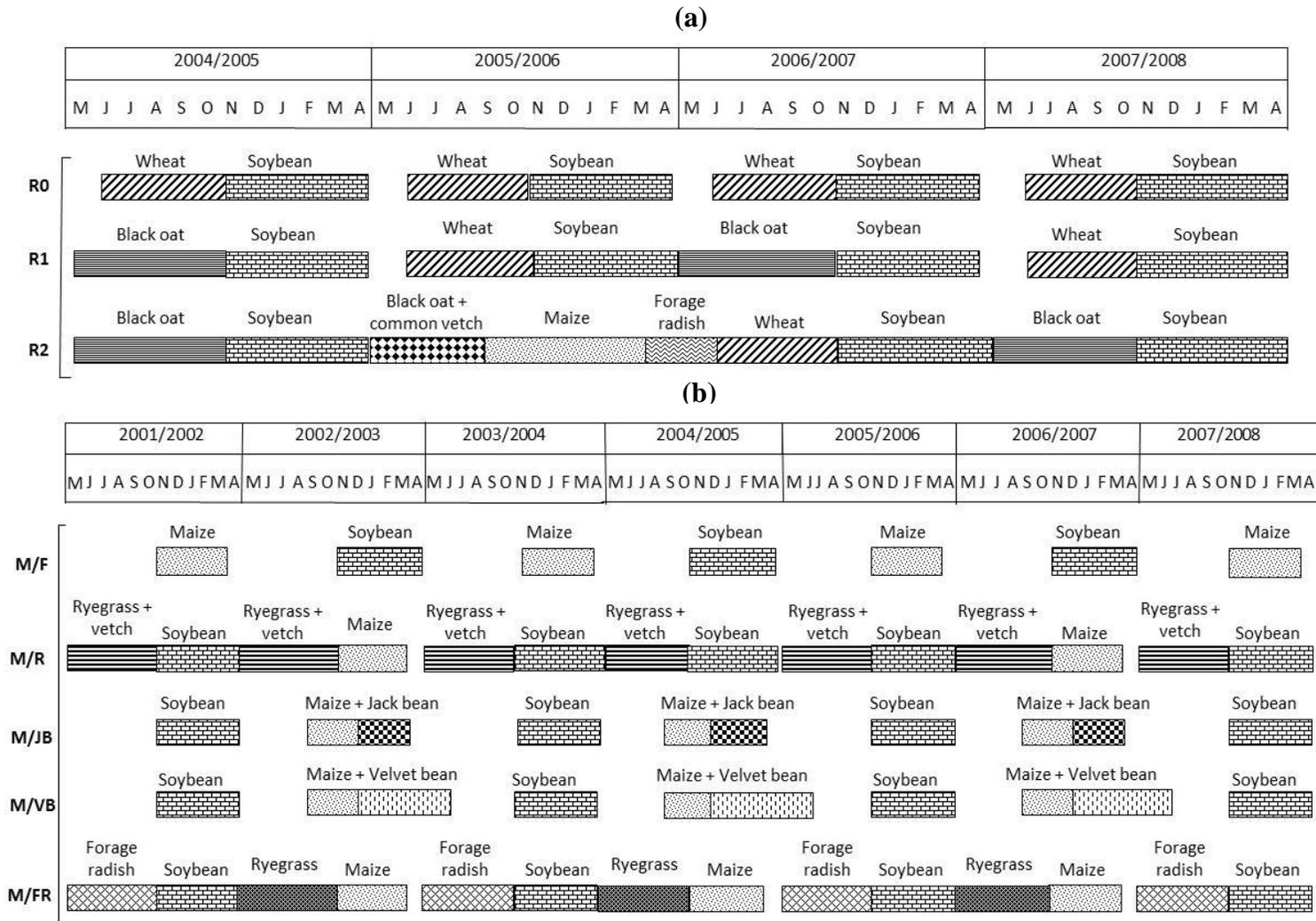


Fig. 1 – Description of crop rotation adopted in. **(a)** Oxisol. **(b)** Alfisol in Southern Brazil. R0= continuous crop succession soybean/wheat; R1= wheat/soybean/oat/soybean; R2= wheat/soybean/oat/soybean/oat+vetch/maize/radish. M/JB= maize + jack bean/soybean; M/F= maize/fallow/soybean; M/R= maize/ryegrass+ vetch/soybean; M/VB= maize+velvet bean/soybean; M/FR= maize/forage radish/soybean.

The Oxisol site was amended with 4.3 Mg ha⁻¹ of dolomitic lime during the establishment of the experiment in 1985. Wheat and maize received 60 and 90 kg N ha⁻¹, respectively. In the first 15 years of the experiment, R1 and R2 crop systems received 52 and 62 kg P₂O₅ ha⁻¹ yr⁻¹, respectively, and 75 and 105 kg K₂O ha⁻¹ yr⁻¹, respectively. The phosphorus and potassium amendment was later standardized at the rate of 50 kg ha⁻¹ yr⁻¹. The N source was urea (45% N), the P source was superphosphate triple (41% P), and the K source was potassium chloride (65% K). Further experimental details were as reported by Boodey et al. (2010) and Campos et al. (2011).

The long-term experiment at the Alfisol site had a completely randomized block design with two replications of the following five treatments: a) maize + jack beans/soybean (M/JB); b) maize/fallow/soybean (M/F); c) maize/ryegrass + common vetch/soybean (M/R); d) maize + velvet beans/soybean (M/VB); and e) maize/radish oil/soybean (M/FR). Detailed information regarding the cropping systems is shown in Table 2. Information regarding the cultivars used is shown in Table 3. Aboveground C and N inputs in these cropping systems were determined when crops were in full flowering through a square wooden frame of 1 m². Details regarding the experimental procedures were as described by Debarba and Amado (1997) and Lanzaova et al. (2010). The soil was amended with 3.5 Mg ha⁻¹ of dolomitic lime in 1991 and 2.0 Mg ha⁻¹ of dolomitic lime in 1996. The nitrogen (N) fertilization rate for maize was set at 130 kg N ha⁻¹ in the M/F, M/FR and M/R treatments and 65 kg N ha⁻¹ in the M/JB and V/B treatments. The phosphorus and potassium amendment was standardized at 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ yr⁻¹ and 50 kg K₂O ha⁻¹ yr⁻¹, respectively. The fertilizer sources used were the same as those used at the Oxisol site.

Table 3 – Analysis of variance (ANOVA) of the two investigated experiments.

Causes of variation	SOC content		CSR
	Oxisol		
Tillage systems (M)	**		**
Cropping systems (C)	**		**
Time (T)	**		**
Layer (L)	**		----
CV(%)	11.26		7.52
M x C	**		**
M x T	**		**
C x T	**		**
M x C x T	**		**
M x L	**		----
C x L	**		----
T x L	**		----
T x C x L	**		----
M x T x L	**		----
M x C x L	**		----
M x C x T x L	**		----
CV(%)	5.44		5.93
	Alfisol		
Culture systems (C)	**		**
Time (T)	**		**
Layer (L)	**		----
CV(%)	18.08		10.70
C x T	**		**
C x L	**		----
T x L	**		----
C x T x L	**		----
CV(%)	13.01		7.59

SOC= soil organic carbon; CSR= carbon stratification ratio.

** p < 0.01.

4.3.2 Soil sampling for SOC concentration

The Alfisol site was sampled in 2001 (T1) and 2007 (T2), corresponding to the 10th and 17th years of the experiment, respectively. The Oxisol site was sampled in 2004 (T1) and 2007 (T2), corresponding to the 19th and 22th years of the experiment, respectively. In both soils, two small trenches (0.3x0.3x0.15 m) per treatment were used as subsamples. These trenches were manually opened, and soil samples from the 0-0.05 m and 0.05-0.15 m soil layers were collected with a spatula. The samples were air-dried and passed through a 2-mm sieve, the roots and plant residues were removed, and the samples were stored until measurements were performed in the laboratory.

Soil bulk density was determined at the same soil sampling depths in undisturbed soil through sampling with steel rings measuring 0.05x0.04 m (Embrapa, 1997). Soil samples were air-dried, the root and plant residues were manually removed, and the samples were finely ground with a mortar and pestle. The SOC was determined through dry combustion

through a C/N analyzer (Flash EA 1112 Series ThermoFinnigan). The SOC stock in the soil layers of 0-0.05; 0.05-0.15 and 0-0.15 m were calculated based on equivalent soil masses (Ellert and Bettany, 1995), taking the treatments M/F (T1) and CT R0 (T1) as references for the Alfisol and the Oxisol sites, respectively.

4.3.3 Carbon stratification ratio

The CSR was calculated as proposed by Franzluebbbers (2002) and is presented in equation 1:

$$\text{CSR} = \frac{\text{SOC in the shallow topsoil (0- 0.05 m)}}{\text{SOC in adjacent soil layer (0.05-0.15 m)}}$$

Eq. 1

Where: CSR = carbon stratification ratio; SOC = soil organic carbon.

These soil layers were chosen based on the studies by Causarano et al. (2008) and Franzluebbbers (2010), which reported strong relationships between the CSR and SOC stock in conservation tillage and a strong relationship between the CSR and soil quality.

The CSR critical value was assessed based on CPI index affected by long-term soil tillage and cropping systems.

4.3.4 Carbon Pool Index

The carbon pool index (CPI) was calculated according to Blair et al. (1995) and is presented in equation 2:

$$\text{Carbon Pool Index (CPI)} = \frac{\text{SOC}_{\text{trat}} \text{ in soil layer (0-0.15 m)}}{\text{SOC}_{\text{ref}} \text{ in soil layer (0-0.15 m)}}$$

Eq. 2

Where: SOC_{trat} = soil organic carbon in given treatment; SOC_{ref} = soil organic carbon in the reference treatment (native vegetation), which was 39.7 Mg C ha⁻¹ for the Oxisol and 17.6 Mg C ha⁻¹ for the Alfisol.

The CPI index, calculated based on last soil sampling time, was used to assess the improvement in quality of soil management.

4.3.5 Statistical analysis

The results were submitted to analysis of variance (ANOVA) through the software SISVAR 5.0 (Ferreira, 2010). The means were compared with through the Tukey test ($p < 0.05$). The regression analysis was performed through JMP IN version 7.0.1 (Sall et al., 2005).

4.3.6 Relationships of SOC, CSR and CPI

After twenty-two years (Oxisol) and seventeen years (Alfisol) the stock of SOC in 0-0.15 m soil layer under different soil tillage and cropping systems was used as independent variable and CSR and CPI as dependent variable in order to investigated the relationships of CSR and CPI indices.

4.4 Results and discussion

4.4.1 Anova

The soil tillage, cropping systems and soil sampling time used had a significant effect on the SOC stock and CSR index in the Oxisol. Cover crops also significantly impacted on the SOC stock and CSR in the Alfisol. Both soils showed significant interaction between SOC stock and the soil depth layer (Table 3).

4.4.2 C and N input by cropping systems

At the Oxisol site, the soil C input ranged from 3.70 to 6.20 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹; at the Alfisol site, this input ranged from 1.88 to 4.51 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ (Table 4). The soil N input ranged from 98 to 233 kg ha⁻¹ yr⁻¹ and from 71 to 217 kg ha⁻¹ yr⁻¹ for the Oxisol and the Alfisol, respectively. The inputs of C and N aboveground were close to those previously reported for cropping systems in other long-term experiments carried out in South Brazil (Conceição et al., 2005; Amado et al., 2006; Bayer et al., 2009; Vieira et al., 2007).

At the Oxisol site, the use of black oats in rotation with wheat on a yearly basis (R1 cropping system) increased the C input by 1.09 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ in NT, compared with the wheat/soybean rotation (R0). While under CT the comparison of these treatments was not

significant (Table 4). The intensive cropping system (R2) consisted of a winter rotation of a consortium of cover crops (black oat + common vetch), wheat over three years, forage radish in autumn, and a summer rotation of soybean for two years, followed by a year of maize (Fig. 1a). This system had an increase in C input of 1.64 and 2.17 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ in CT and NT, respectively, compared with that of R0 (Table 4). The N input in R1 increased by 61 and 69 kg ha⁻¹ yr⁻¹ in CT and NT, respectively, compared with that of R0. The N input in R2 increased by 126 and 130 kg ha⁻¹ yr⁻¹ in CT and NT, respectively, compared with the reference treatment (R0). In summation, for the same cropping system, input of C was higher in NT, except for C input in R0 that was similar between tillage systems. This result is most likely due to long-term improvements in soil fertility under conservation tillage. Over the 22-year experimental period, NT had a higher C input of 7.9 and 11.7 Mg ha⁻¹ in R1 and R2, respectively, compared with CT. In the intensive cropping system (R2), the higher C input in NT in relation to CT was equivalent to an extra year of C input every ten years. Comparing the two treatments over the whole experimental period, C and N inputs were 55.0 Mg ha⁻¹ and 3.0 Mg ha⁻¹ higher, respectively, in NTR2 compared with that of CTR0.

At the Alfisol site, the use of forage radish (M/FR) to replace winter fallow (M/F) increased C input by 1.88 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ (Table 4). Yet, the N input increased by 70 kg ha⁻¹ yr⁻¹. The use of tropical legumes (jack bean and velvet bean) increases the C input by 2.19 and 2.63 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ in M/JB and M/VB, respectively, compared with the reference treatment (M/F). The annual soil N input compared with M/F was 135 N ha⁻¹ yr⁻¹ greater in M/JB and 146 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ greater in M/VB. During the 17-year experimental period, the M/VB and M/JB had higher accumulated C inputs of 37.2 Mg C ha⁻¹ and 44.7 Mg C ha⁻¹, respectively, compared with M/F. The accumulated N compared with M/F was 2.3 Mg ha⁻¹ greater in M/VB and 2.5 Mg ha⁻¹ greater in M/JB.

Table 4 – Mean annual aboveground crop residues C, N inputs.

Soil	Tillage systems	Cropping systems	N input, cover crop(s)	Annual C input
			kg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹
Oxisol	CT	R0 ¹	98 c	3.70 c
	CT	R1 ²	159 b	4.43 c
	CT	R2 ³	224 a	5.34 b
	NT	R0	103 c	4.03 c
	NT	R1	172 b	5.12 b
	NT	R2	233 a	6.20 a
Alfisol	NT	M/F ⁴	71 d	1.88 c
	NT	M/R ⁶	141 c	3.76 b
	NT	M/JB ⁷	217 a	4.07 a
	NT	M/VB ⁷	206 a	4.51 a
	NT	M/FR ⁸	160 b	4.10 a

¹R0 = succession soybean/wheat; ²R1= wheat/soybean/oat/soybean; ³R2= wheat/soybean/oat/soybean/oat+vetch/maize/radish. T₁=2004; T₂= 2007. ⁴M/JB= maize + Jack bean/soybean; ⁵M/F= maize/fallow/soybean; ⁶M/R= maize/ryegrass+ vetch/soybean; ⁷M/VB= maize + velvet bean/soybean; ⁸M/FR= maize/forage radish/soybean. NT= no-tillage; CT= conventional tillage; N= nitrogen; C= carbon. Averages followed by the same letters, lower case in the columns, do not differ by the Tukey test, to the level 5% of significance. Comparison is between cropping systems (in the same type of soil).

4.4.3 Concentration of SOC in different soil layers

The CSR index is a comparison of two soil layers usually a shallow topsoil and an adjacent layer. In our study the CSR evaluates the impact of soil tillage and cropping system on these soil layers. The concentration of SOC in 0-0.05 and 0.05-0.15 m soil layers under different tillage and cropping systems are shown in Table 5. Based on last soil sampling time, under CT a homogeneous concentration of SOC was observed with no difference between 0-0.05 and 0.05-0.15 m, regardless of cropping system (Table 5). On the other hand, under NT there was difference in concentration of SOC among cropping systems in 0-0.05 m soil layer. Yet, the concentration of SOC in the shallow topsoil was higher in NT compared with CT (Table 5).

Table 5 – SOC concentration and CSR in the Oxisol as affected by soil tillage and cropping systems.

Sampling period	Cropping systems	Tillage systems	
		CT	NT
	SOC concentration, g kg ⁻¹ (0 – 0.05 m)		
T1	R0 ¹	21.3 Ba	26.7 Aa
	R1 ²	22.5 Ba	27.9 Aa
	R2 ³	23.6 Ba	28.4 Aa
T2	R0	20.4 Ba	24.8 Ab
	R1	20.5 Ba	27.8 Aab
	R2	21.1 Ba	30.9 Aa
	SOC concentration, g kg ⁻¹ (0.05 – 0.15 m)		
T1	R0	19.6 Aa	17.8 Aa
	R1	19.9 Aa	18.0 Aa
	R2	21.0 Aa	18.6 Aa
T2	R0	18.8 Aa	17.9 Aa
	R1	19.4 Aa	17.8 Aa
	R2	19.2 Aa	18.0 Aa
	CSR (0-0.05: 0.05-0.15 m)		
T1	R0	1.04 Ba	1.50 Aa
	R1	1.13 Ba	1.55 Aa
	R2	1.12 Ba	1.53 Aa
T2	R0	1.08 Ba	1.39 Ac
	R1	1.06 Ba	1.56 Ab
	R2	1.10 Ba	1.72 Aa

¹R0= succession soybean/wheat; ²R1= wheat/soybean/oat/soybean; ³R2= wheat/soybean/oat/soybean/oat+vetch/maize/radish. T1=2004; T2= 2007. SOC= soil organic carbon; CSR= carbon stratification ratio. NT= no-tillage; CT= conventional tillage. CSR= SOC in the shallow topsoil (0- 0.05 m)/ SOC in adjacent soil layer (0.05-0.15 m). Averages followed by the same letters, small (columns) and capital (lines) do not differ by the Tukey test (P<0.05), between the cropping systems (columns) and tillage systems (lines).

In cropping systems used in the Oxisol, in the last soil sampling time the concentration of SOC (in the 0-0.05 m soil layer) was 27.8 ± 0.72 g kg⁻¹ under NT and 20.5 ± 0.68 g kg⁻¹ under CT (Table 5). The concentration of SOC in NT was 35.6 % greater than in CT. Among contrasting C and N inputs treatments, the concentration of SOC was highest under NT R2 (30.9 ± 0.61 g kg⁻¹) and lowest under CTR0 (21.1 ± 0.30 g kg⁻¹). Therefore, the concentration of SOC in the shallow topsoil was associated with minimum soil disturbance and intensive crop rotation. The R2 cropping system had the highest C input (Table 4), confirming that NT is a C-conservative system.

In the adjacent soil layer (0.05-0.15 m), based on the last soil sampling time the mean concentration of SOC across cropping systems was similar under NT and CT, respectively (Table 5).

At the Alfisol site, based on the last soil sampling time the mean concentration of SOC across cropping systems in the 0-0.05-m soil layer was $12.1 \pm 1.26 \text{ g kg}^{-1}$; individual measurements ranged from 10.3 to 13.6 g kg^{-1} for M/F and M/JB treatments, respectively, these treatments were statically different (Table 6). The surface crop residue input under NT promoted a higher accumulation of SOC in the shallow topsoil (0-0.05 m) in tropical soils (Bayer et al., 2000; Tivet et al., 2013).

For the adjacent soil layer (0.05-0.15 m), the mean concentration of SOC was $7.1 \pm 0.24 \text{ g kg}^{-1}$; individual measurements ranged from 6.8 to 7.4 g kg^{-1} for M/F and M/JB treatments, respectively, without statistical significance (Table 6). Therefore, the presence of cover crops increased the concentration of SOC, mainly in the 0-0.05-m soil layer (Balesdent et al., 1990). The concentration of SOC in the shallow topsoil in the last soil sampling time for the treatments M/FR, M/VB and M/JB were 22.3 %, 23.3 % and 32.0 % higher, respectively, than in the M/F treatment.

Table 6 – SOC concentration and CSR in the Alfisol as affected by cropping systems under no-till.

Sampling period	Cropping systems				
	M/F ¹	M/R ²	M/JB ³	M/VB ⁴	M/FR ⁵
SOC concentration, g kg^{-1} (0 – 0.05 m)					
T1	6.9 Bb	9.2 ABa	8.9 ABb	11.6 Aa	11.9 Aa
T2	10.3 Ba	11.6 ABa	13.6 Aa	12.7 Aa	12.6 Aa
SOC concentration, g kg^{-1} (0.05 – 0.15 m)					
T1	5.2 Aa	5.3 Aa	4.9 Aa	5.6 Aa	5.9 Aa
T2	6.8 Aa	7.1 Aa	7.4 Aa	7.2 Aa	6.9 Aa
CSR (0-0.05: 0.05-0.15 m)					
T1	1.32 Ca	1.74 Ba	1.81 ABa	2.08 Aa	1.97 ABa
T2	1.51 Ba	1.62 ABa	1.82 Aa	1.76 Ab	1.80 Aa

¹M/F= maize/fallow/soybean; ²M/R= maize/ryegrass+ vetch/soybean; ³M/JB= maize + Jack bean/soybean; ⁴M/VB= maize+Velvet bean/soybean; ⁵M/FR= maize/forage radish/soybean. T1=2001; T2= 2007. SOC= soil organic carbon; CSR= carbon stratification ratio. CSR= SOC in the shallow topsoil (0- 0.05 m)/ SOC in adjacent soil layer (0.05-0.15 m). Averages followed by the same letters, small (columns) and capital (lines) do not differ by the Tukey test ($P<0.05$), between the sampling period (columns) and cropping systems (lines).

4.4.4 Improvement in the quality of soil management

To assess the impact of soil management practices on soil quality, the CPI index was used (Fig. 2). In the Oxisol, the main strategies for improving quality of soil management were reducing soil disturbance by replacing CT for NT and adopting an intensified cropping system (Fig. 1a). Conceição et al. (2005) investigated soil tillage and cropping systems in the

Alfisol and reported that the use of NT and crop rotation for 15 years results in the highest soil quality in relation to other treatments. In our study, treatments with frequent tillage operations and a lack of crop rotation (CT R0) had the lowest CPI (Fig. 2).

The tillage impact on soil quality could be assessed by the CPI index. Under CT, the CPI was similar in R0 and R2 treatments. Under NT, the CPI values were 0.91 to 0.98 in R0 and R2, respectively, representing an increase of 7.1 % which was statistically different (Fig. 2a). Therefore, CT neglected the impact of crop rotation on the CPI index, while under NT the intensified cropping system (R2) resulting in the highest CPI. Previously, Amado et al. (2006) studied C-sequestration rates under tillage and crop systems and reported that CT negates the crop rotation effect.

In Alfisol, the main improvement in the CPI occurred with the use of cover crops that increased soil C input and tropical legumes that increased N input through biological fixation (Fig. 1b). The treatment M/F, which has winter fallow, had the lowest CPI value. Vieira et al. (2009) reported previously that the SOC stock at a 0-0.175-m depth in NT maize systems in Alfisol with pigeon pea (*Cajanus cajan* L.) or lablab (*Lablab purpureus* L.) had increases of 32 % and 53 %, respectively, in relation to winter fallow/maize over 19 years. Urquiaga et al. (2010) and Boddey et al. (2011) reported that cropping systems with legume cover crops showed the highest SOC stocks, highlighting the importance of biological N fixation on increased soil C sequestration under NT. In our study, the CPI index increased by 27.5 % and 36.2 % in M/VB and M/FR cropping systems, respectively, compared with M/F. Therefore, the low soil quality observed in M/F indicates that minimal soil disturbance was not enough to obtain high soil quality, in agreement with Vieira et al. (2009). Regardless of the soil order, the CPI index was a sensitive indicator quality of soil management.

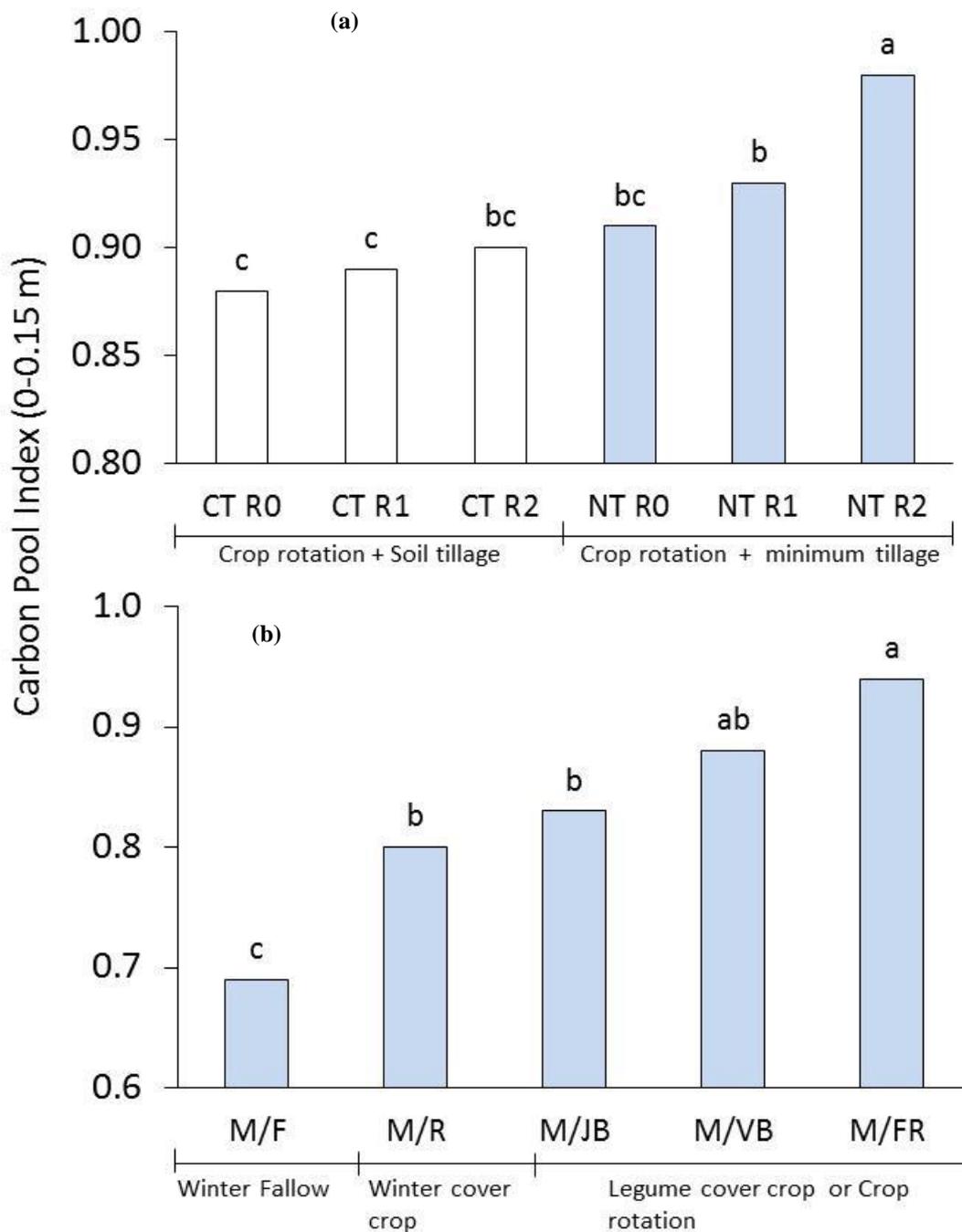


Fig. 2 – Soil quality in response to improvements on soil management and crop rotation systems. **(a)** Oxisol; **(b)** Alfisol. CT= conventional tillage; NT= no-tillage. R0= continuous crop succession soybean/wheat; R1= wheat/soybean/oat/soybean; R2= wheat/soybean/oat/soybean/oat+vetch/maize/radish. M/JB= maize + jack bean/soybean; M/F= maize/fallow/soybean; M/R= maize/ryegrass+ vetch/soybean; M/VB= maize+velvet bean/soybean; M/FR= maize/forage radish/soybean. Carbon Pool Index= SOC in the treatment/ SOC in the control (native vegetation). SOC= soil organic carbon. Tukey test, to the level 5% of significance

4.4.5 Relations of SOC, CSR and CPI indices

The SOC stocks (0-0.15 m) in the topsoil had a positive linear relationship with the CSR in both the Oxisol ($p < 0.002$) and the Alfisol ($p < 0.01$) (Fig. 3a, 3b). Ferreira et al. (2012) previously reported a relationship between SOC and the CSR ($p < 0.0001$) in the Oxisol in Paraná State (Brazil). The slope of the adjusted equations was similar between the Oxisol and the Alfisol. In the Oxisol, in last soil sampling time an increase of SOC of 3.82 Mg ha^{-1} was observed for NT R2 compared with that of CT R0 (Fig. 3a). In the Alfisol, in last soil sampling time, an increase of SOC of 2.25 Mg ha^{-1} was observed for M/FR compared with M/F (Fig. 3b). These interactions resulted in an increase in the CSR of 0.64 for the Oxisol NT R2 compared with that of CT R0 and 0.29 for the Alfisol M/FR compared with M/F (Fig. 3a, 3b).

The Oxisol had C inputs between 3.70 and 6.20 Mg ha^{-1} . This was generally greater than the C inputs found in the Alfisol, which ranged between 1.88 and 4.51 Mg ha^{-1} (Table 4). The CSR values were lower in the Oxisol compared with the Alfisol (Fig. 3b). In last soil sampling time, the higher SOC stocks in the adjacent soil layer (0.05-0.15 m) of the Oxisol (which ranged from 17.8 to 19.4 Mg ha^{-1}) in relation to the Alfisol (which ranged from 6.8 to 7.4 Mg ha^{-1}) may explain the lower CSR values in Oxisol (Table 6). The SOC-depleted subsoil in Alfisol explains why the same amount of surface crop C input results in a higher CSR than in the Oxisol, which has a higher concentration of SOC in the subsoil. These results reinforce the fact that the soil type should be considered when evaluating the CSR.

SOC stocks (0-0.15 m) in different soil management practices had positive linear relationships with the CPI in both the Oxisol ($p < 0.0002$) and the Alfisol ($p < 0.001$) (Fig. 3c, 3d). This result was expected because the CPI index has been reported to be an efficient indicator of soil quality (Blair et al., 1995; Shang and Tiessen, 1997; Dieckow et al., 2005; Vieira et al., 2007). The CPI ranged between maximum and minimum values was 0.10 in the Oxisol (Fig. 3c) and 0.25 in the Alfisol (Fig. 3d). Lower CPI values were observed in the M/F treatment in the Alfisol and the CTR0 treatment in the Oxisol. This result is consistent with the SOC loss in these treatments relative to native vegetation; in last soil sampling time the SOC loss was 13.3 % and 11.8 % in M/F and CT R0, respectively, compared with native vegetation. Under improved soil management practices (NT R2 and M/FR), both soils achieved higher CPI values (0.98 and 0.94 in the Oxisol and the Alfisol, respectively) (Fig. 3c, 3d).

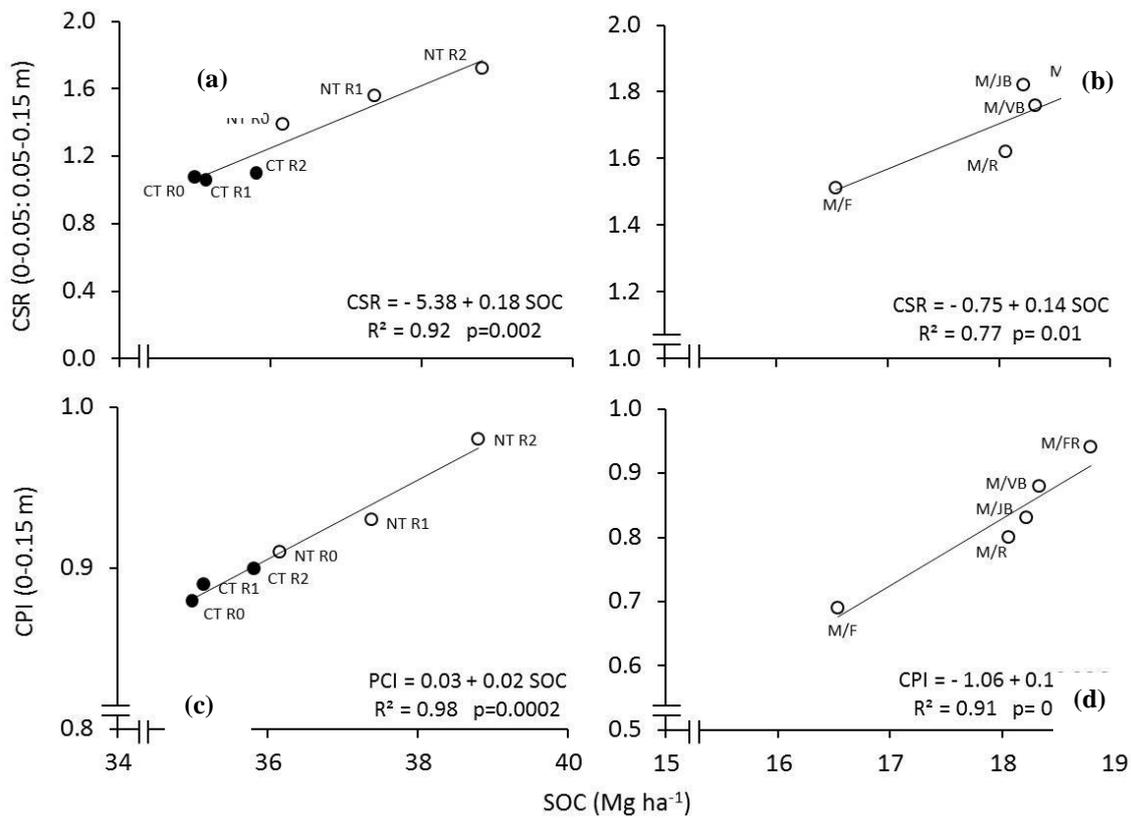


Fig. 3 – Relations of SOC (0-0.15 m), CSR (0-0.05: 0.05-0.15 m), and CPI indices (0-0.15 m). **(a, c)** Oxisol. **(b, d)** Alfisol. CSR= carbon stratification ratio; CPI= carbon pool index; SOC= soil organic carbon; CT= conventional tillage; NT= no-tillage. R0= continuous crop succession soybean/wheat; R1= wheat/soybean/oat/soybean; R2= wheat/soybean/oat/soybean/oat+vetch/maize/radish. M/JB= maize + jack bean/soybean; M/F= maize/fallow/soybean; M/R= maize/ryegrass + vetch/soybean; M/VB= maize + elvet bean/soybean; M/FR= maize/forage radish/soybean. CPI= SOC in the treatment/ SOC in the control (native vegetation). CSR= SOC in the shallow topsoil (0- 0.05 m)/ SOC in adjacent soil layer (0.05-0.15 m).

Franzluebbers (2002, 2010) suggested that the measurement of the CSR can be as an indicator of quality soil management, with the characteristics of low cost, efficiency, and sensitivity to soil management practices. In our study, as expected, the CSR had a positive linear relationship with the CPI in both the Alfisol ($p < 0.01$) and the Oxisol ($p < 0.02$) (Fig. 4). In the Alfisol, the CSR in last soil sampling time ranged from 1.51 to 1.82, and the CPI ranged from 0.69 to 0.94. In the Oxisol, the CSR ranged from 1.06 to 1.72, and the CPI ranged from 0.88 to 0.98 (Fig. 4a). If the CPI is 0.90 in both soils, the CSR in the Alfisol will be 1.68 and the CSR in the Oxisol will be 1.10, by their respective adjusted equations (Fig. 4b). This result illustrates that soil type has a strong effect on the CSR.

In the Oxisol under CT, the CSR in last soil sampling time ranged from 1.06 (R0) to 1.10 (R2) (Table 5). In the Oxisol under NT, the CSR ranged from 1.39 (R0) to 1.72 (R2). The CPI under CT ranged from 0.88 (R0) to 0.90 (R2). The CPI under NT ranged from 0.91 (R0) to 0.98 (R2) (Fig. 4a). The NT R1 and NT R2 treatments were considered to have a high soil quality; these treatments had CSR values of 1.56 (NT R1) and 1.72 (NT R2) and CPI values of 0.93 (NT R1) and 0.98 (NT R2) (Fig. 4a).

The CSR increases under NT were associated with an accumulation of SOC in the shallow topsoil layer because the concentration of SOC in the adjacent soil layer was similar between cropping systems (Table 5). In last soil sampling time the concentration of SOC in the shallow topsoil layer under NT was 24.8 g kg^{-1} and 30.9 g kg^{-1} for R0 and R2, respectively, representing an increase of 24.6 % (Table 5). However, there was no increase in SOC in the adjacent soil layer in the comparison of NT and CT. Increasing concentration of SOC in the shallow topsoil has been reported as critical for soil quality, especially by increasing CEC, nutrient availability, and biological activity and by improving soil structure in addition to positive effects on gas exchange, water infiltration, soil porosity and aggregate stability (Franzluebbers, 2002; Moreno et al., 2006; Causarano et al., 2008; Sá and Lal, 2009; Tivet et al., 2013).

In the Alfisol, the highest soil quality was observed in the M/JB, M/VB and M/FR treatments, which had CSR values of 1.82, 1.76 and 1.80, respectively. The CPI values for M/JB, M/VB and M/FR were 0.83, 0.88 and 0.94, respectively (Fig. 4b). Based on last soil sampling time, the use of legumes and grasses under M/JB promoted a long-term increase in the CSR by 20.5 % compared with the M/F treatment. The treatment with the highest soil quality was M/FR (Fig. 4b), most likely due to a higher frequency of maize over soybean and the presence of radish oil (Fig. 1b), which improves the condition of soil physics (Nicoloso et al., 2008; Lanzanova et al., 2010).

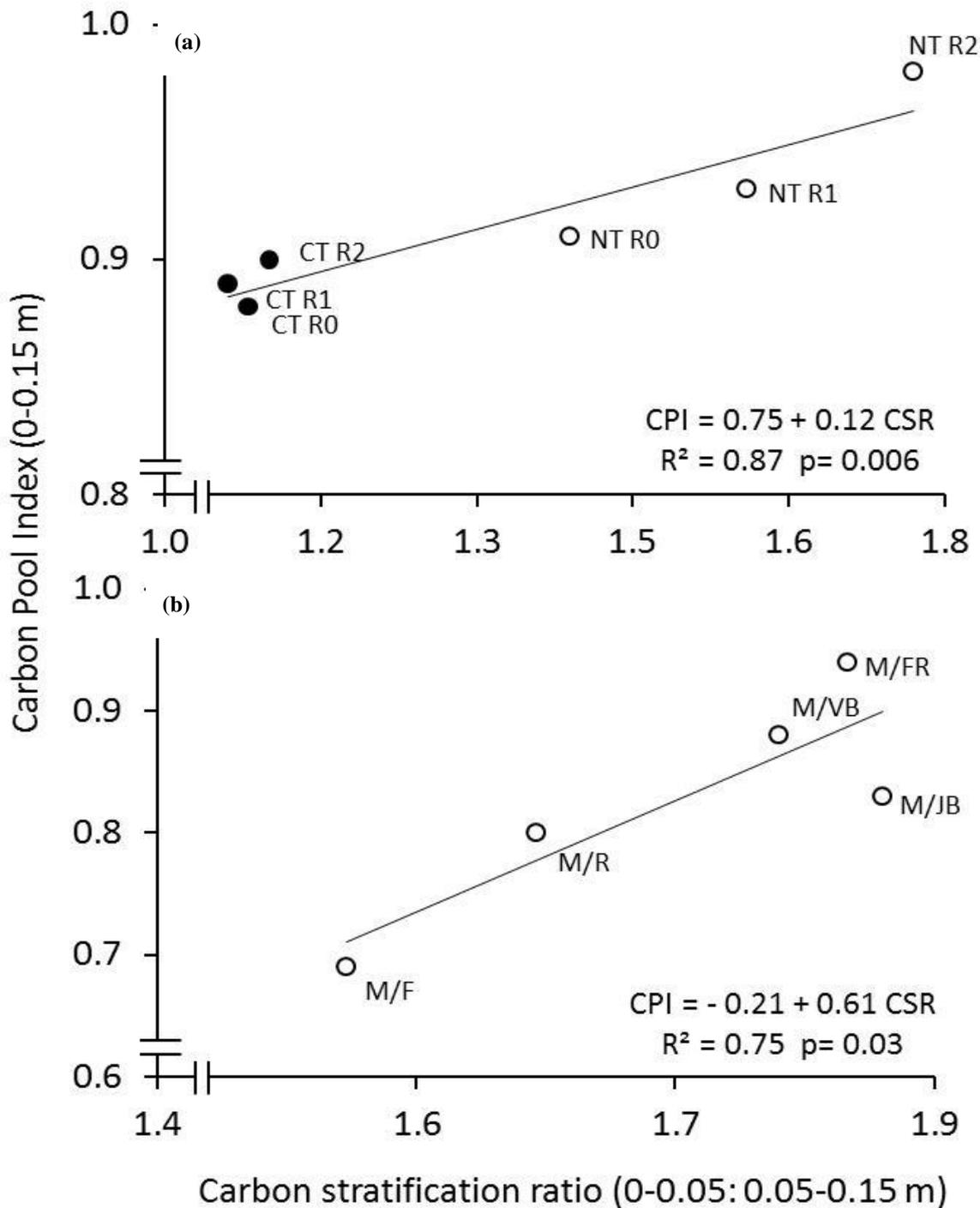


Fig. 4 – CSR-based quantitative system proposed for classification of soil quality levels. (a) Oxisol; (b) Alfisol. CPI= carbon pool index; CSR = carbon stratification ratio; CT= conventional tillage; NT= no-tillage. R0= continuous crop succession soybean/wheat; R1= wheat/soybean/oat/soybean; R2= wheat/soybean/oat/soybean/oat+vetch/maize/radish. M/JB= maize + jack bean/soybean; M/F= maize/fallow/soybean; M/R= maize/ryegrass+ vetch/soybean; M/VB= maize+velvet bean/soybean; M/FR= maize/forage radish/soybean. CPI= SOC in the treatment/ SOC in the control (native vegetation). CSR= SOC in the shallow topsoil (0- 0.05 m)/ SOC in adjacent soil layer (0.05-0.15 m). SOC= soil organic carbon.

4.4.6 CSR in different agroecosystems

When the data were averaged over sampling times, the CSR values under NT were 1.54 and 1.74 in the Oxisol (Table 5) and the Alfisol (Table 6), respectively. The mean CSR values under CT were 1.09 in the Oxisol (Table 5). Here, we provide a broad review regarding the CSR in long-term soil management from different agroecosystems (Table 7). In temperate soils, CSR values under NT had a mean of 2.7 (ranging between 1.5 and 3.7). Under CT, the CSR had a mean of 1.5 (ranging between 1.2 and 1.9). These mean CSR values are 80 % and 38 % higher than what we found in the Oxisol for NT and CT, respectively. In the Alfisol, the CSR in temperate climate was 59 % higher than what was found in our study. In subtropical soils, the literature reports that the mean CSR under NT was 1.7 (ranging between 1.3 and 2.1). Under CT, the mean CSR was 1.2 (ranging between 1.1 and 1.3) in subtropical soils (Table 7). These values are close to what was found in our study. For similar soil management practices, the CSR was lower in subtropical soils than what was previously reported for temperate soils (Table 6). The lower CSR values in subtropical soils compared with temperate soils could be related to a more oxidative C environment and less stable chemical C in topsoil (Bayer et al., 2000).

A CSR value of 2.0 was suggested as a critical limit for maintaining soil quality in temperate climates (Franzluebbers, 2002). The critical CSR value for tropical and subtropical soils is still unknown, but based on our study the CSR values of 1.5 and 1.7 for the Oxisol and the Alfisol, respectively discriminate the improvement in the quality of soil management (Fig. 4). Based on this, the NT R1 and NT R2 treatments in the Oxisol could be considered to be high quality. In the Alfisol, the M/JB, M/VB and M/FR treatments also could be classified as high quality.

Table 7 – Carbon stratification ratio (CSR) as affected by long-term tillage and cropping systems in temperate and subtropical agroecosystems.

Climate	Soil	Location	Soil layer (m)	Soil tillage system	NT adoption time	Cropping system	CSR	Source
Temperate	Typic Eutrocryept	Alberta/British, Canadá	0-0.05: 0.125-0.20	NT	7	small-grain cropping systems	2.1	Franzluebbers 2002
				CT			1.9	
	Typic Hapludults	Virginia coastal plain, EUA	0-0.025: 0.075–0.15	NT	13	Maize/ double-crop soybean	2.3	Spargo et al. 2008
				NT	14	Maize / double-crop soybean	3.2	Spargo et al. 2008
				NT	14	Maize / double-crop soybean	2.4	Spargo et al. 2008
Hapli-Ustic Cambosols	Northeast of China	0-0.05:0.20-0.40	NT	12	Maize	1.5 a 1.8	Lou et al., 2012	
			CT			1.2 a 1.3	Lou et al., 2012	
Vertisol (Typic Haploxererts)	Córdoba, Spain	0-0.05: 0.15-0.30	NT	22	Wheat/fallow/wheat-chickpea/ wheat–faba bean/ wheat sunflower	3.7	Melero et al., 2012	
			CT			1.5	Melero et al., 2012	
Typic Paleudalfs	kentucky EUA	0-0.05: 0.15-0.30	NT	30	Maize /Soybean/Wheat/double-crop soybean.	3.4	Díaz-Zorita and Grove, 2002	
Subtropical	Udifulventic Ustochrept	South-Central Texas, EUA	0-0.05: 0.125-0.20	NT	10	Wheat/soybean/sorghum	2.0	Franzluebbers 2002
				CT			1.2	
	Xerofluvent	Seville, Spain	0-0.05: 0.10-0.25	NT	10	Wheat–sunflower	1.6	Moreno et al., 2006
				CT			1.2	Moreno et al., 2006
	Xerofluvent	Seville, Spain	0-0.05: 0.25-0.40	NT	10	Wheat–sunflower	2.1	Moreno et al., 2006
				CT			1.3	Moreno et al., 2006
	Typic Hapludox	Tibagi, PR, Brasil	0-0.05:0.05-0.10	NT	20	Soybean /maize/wheat/black oats	1.6	Sá and Lal, 2009
	Typic Hapludox	Ponta Grossa, PR, Brasil	0-0.05:0.05-0.10	NT	22	Soybean/maize/wheat/ black oats	1.7	Sá and Lal, 2009
				CT			1.1	Sá and Lal, 2009
	Rhodic Eutrudox	Palotina, PR, Brasil	0-0.05:0.10-0.20	NT	9	Maize/wheat/soybean/black oat-forage radish Soybean/maize sucesion	1.7	Tormena et al. 2004
CT					1.2		Tormena et al. 2004	
Typic Hapludox	Ponta Grossa, PR, Brasil	0-0.05:0.05-0.20	NT	20	Wheat/soybean/black oat+vetch/maize	1.3 a 1.6	Ferreira et al. 2009	

NT= No-tillage; CT= Conventional tillage.

4.5 Conclusions

The soil order should be considered when defining the critical CSR value to sustain soil quality. In more oxidative environments, such as tropical and subtropical climates, the critical CSR value is lower than previously proposed for temperate soils. In Brazilian agriculture because of the highly oxidative SOC environment, the improvement in quality of soil management is captured by CSR index.

Higher SOC, CSR and CPI values were found when soil was minimally disturbed and crop rotation was intensified. Low indices were found under tilled soils that were associated with short fallow periods and lower crop diversity.

4.6 References

- Amado, T. J., Bayer, C., Conceição, P. C., Spagnollo, E., Campos, B.C., Veiga, M. 2006. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Brazil. *Journal of Environment Quality* 35, 1599-1607.
- Angers, D. A., Voroney, R. P., Côté, D. 1995. Dynamics of soil organic matter and corn residues affected by tillage practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 1311–1315.
- Baker, J. M., Ochsner, T. E., Venterea, R. T., Griffis, T. J. 2006. Tillage and soil carbon sequestration-What do we really know? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118, 1-5.
- Bayer, C., Mielniczuk, J., Amado, T. J. C., Martin-Neto, L., Fernandes, S.V. 2000. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research* 54, 101–109.
- Bayer, C., Dieckow, J., Amado, T. J.C., Eltz, F. L. F., Vieira, F. C. B. 2009. Cover Crop Effects Increasing carbon storage in a subtropical no-till sandy Acrisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 40, 1.499-1.511.
- Blanco-Canqui, H., Lal, R. 2008. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: an on-farm assessment. *Soil Science Society of America Journal* 72, 693-701.
- Blair, J. B., Lefroy, R. D. B., Lisle, L. 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research* 46, 1459-1466.
- Boddey, R. M., Jantalia, C. P., Conceição, P. C., Zanatta, J. A., Bayer, C., Mielniczuk, J., Dieckow, J., Santos, H. P., Denardin, J.E., Aita, C., Giacomini, S. J., Alves, B. J. R., Urquiaga, S. 2010. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. *Global Change Biology* 16, 784-795.

Campos, B. H., Amado, T. J. C., Bayer, C., Nicoloso, R. S., Fiorin, J. 2011. Carbon stock and its compartments in a subtropical oxisol under long-term tillage and crop rotation systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 35, 805-817.

Causarano, H. J., Franzluebbbers, A. J., Shaw, J. N., Reeves, D. W., Raper, R. L., Wood, C. W. 2008. Soil organic carbon fractions and aggregation in the Southern Piedmont and Coastal Plain. *Soil Science Society of America Journal* 72, 221-230.

Conceição, P. C., Amado, T. J. C., Mielniczuk, J., Spagnollo, E. 2005. Soil organic matter and other attributes as indicators to evaluate soil quality in conservation systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 29, 777-788. (In portuguese)

Debarba, L., Amado, T. J. C. 1997. Development of sustainable corn production systems in southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 21, 473-480.

Doran, J. W., Parkin, T. B. 1994. Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicsek, D.F.; Stewart, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Soil Science Society of America Journal, 3-22.

Díaz-Zorita, M., Grove, J. H. 2002. Duration of tillage management affects carbon and phosphorus stratification in phosphatic Paleudalfs. *Soil and Tillage Research* 66, 165–174.

Dieckow, J., Mielniczuk, J., Knicker, H., Bayer, C., Dick, D. P., Kogel-Knabner, I. 2005. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilization. *Plant and Soil* 268, 319–328.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual of methods of soil analysis*. 2ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, p. 212, 1997. (In portuguese)

Ellert, B. H., Bettany, J. R. 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science* 75, 529-538.

Ferreira, D. F. (Biud 75). 2010. SISVAR: A program for analysis and teaching statistics. (In Portuguese.) *Rev. Symp.* 6:36-41.

Ferreira, A. O. 2009. Organic matter pools as indicators of carbon sequestration under no tillage for long-term. Master's Thesis in Graduation Program of Agronomy in State University of Ponta Grossa, PR, Brazil (in Portuguese).

Ferreira, A. O., Sá, J. C. M., Harms, M. G., Miara, S., Briedis, C., Quadros Netto, C., Santos, J. B., Canalli, L. B. S., Dias, C. T. S. 2012. Stratification ratio as soil carbon sequestration indicator in macroaggregates of Oxisol under no-tillage. *Ciência Rural* 42, 645-652. (In portuguese).

Franzluebbbers, A. J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research* 66, 95–106.

- Franzluebbers, A. J. 2010. Achieving soil organic carbon sequestration with conservation agricultural systems in the southeastern USA. *Soil Science Society of America Journal* 74, 347-357.
- Gabet, E., Reichman, O., Seabloom, E. 2003. The effects of bioturbation on soil processes and sediment transport. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 31, 249–273.
- Golchin, A., Oades, J.M., Skjemstad, J. O., Clarke, P., 1994. Soil structure and carbon cycling. *Aust. J. Soil Res.* 32, 1043-1068.
- Hernanz, J. L., Loópez, R., Navarrete, L., Sánchez-Girón, V. 2002. Long-term effects of tillage systems and rotations on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central Spain. *Soil and Tillage Research* 66, 129–141.
- Islam, K. R., Weil, R. R. 2000. Soil quality indicator properties in mid-atlantic soils as influenced by conservation management. *Journal of Soil and Water Conservation* 55, 69-78.
- Jackson, M. L. 1962. *Soil chemical analysis*. New Delhi, Prentice Hall of India Pvt. Ltd, 498 p.
- Jastrow, J.D ., Boutton, T. W., Miller. R.M. 1996. Carbon dynamics of aggregate associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 801–807.
- Jimenez, J. J., R. Lal. 2006. Mechanisms of C sequestration in soils of Latin America. *Critical Reviews in Plant Sciences* 25, 337–365.
- Karlen, D. L., Wollenhaupt, N. C., Erbach, D. C., Berry, E. C., Swan, J. B., Eash, N. S., Jordahl, J. L. 1994. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. *Soil and Tillage Research* 31, 149-167.
- Lanzanova, M. E., Eltz, F. L. F., Nicoloso, R. S., Amado, T. J.C., Reinert, D.J ., Rocha, M. R. 2010. Physical properties of a typic paleudalf under long-term no-tillage and cropping systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34, 1333-1342. (In portuguese)
- Lou, Y., Xu, M., Chen, X., He, X., Zhao, K. 2012. Stratification of soil organic C, N and C:N ratio as affected by conservation tillage in two maize fields of China. *Soil and Tillage Research* 95, 124–130.
- Maluf, J. R. T. 2000. Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 8,141-150. (In portuguese)
- Moreno, F., Murillo, J. M., Pelegrín, F., Girón, I. F. 2006. Long-term impact of conservation tillage on stratification ratio of soil organic carbon and loss of total and active CaCO₃. *Soil and Tillage Research* 85, 86–93.
- Melero, S., López-Bellidob, R. J., López-Bellido, L., Muñoz-Romero, V., Moreno, F., Murillo, J. M., Franzluebbers, A. J. 2012. Stratificationratios in a rainfed Mediterranean Vertisol in wheat under different tillage, rotation and N fertilization rates. *Soil and Tillage Research* 119, 7-12.

Neff, J. C., Asner, G. P. 2001. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: Synthesis and a model, *Ecosystems* 4, 29-48.

Nicoloso, R. S., Amado, T. J. C., Schneider, S., LanzaNova, M. E., Girardello, V., Bragagnolo, J., Girardello, R. 2008. Efficiency of mechanical and biological chiseling in the improvement of physical attributes of a heavy clay oxisol and the increment of soybean yield. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32, 1723-1734. (In portuguese)

Olchin, G. P., Ogle, S., Frey, S. D., Filley, T. R., Paustian, K., Six, J. 2008. Residue carbon stabilization in soil aggregates of no-till and tillage management of dryland cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 507-513.

Pes, L. Z., Amado, T. J. C., La Scala, N., Bayer, C., Fiorin, J. E. 2011. The primary sources of carbon loss during the crop-establishment period in a subtropical Oxisol under contrasting tillage systems. *Soil and Tillage Research* 117, 163-171.

Prescott, C. E., Weetman, G. F., Demontigny, L. E., Preston, C. M., Keenan, R. J. 1995. Carbon chemistry and nutrient supply in cedar-hemlock and hemlock-amabilis fir forest floors. In: McFee, W.W., Kelley, J.M. (Eds.). *Carbon Forms and Functions in Forest Soils*. Soil Science Society of America Journal, p.377-396.

Razafimbelo, T. M., Albrecht, A., Oliver, R., Chevallier, T., Chapuis-Lardy, L., Feller, C. 2008. Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayey soil under Malagasy conventional and no-tillage systems. *Soil and Tillage Research* 98, 140-149.

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

Santos, N. Z., Dieckow, J., Bayer, C., Molin, R., Favaretto, N., Pauletti, V., Piva, J. T. 2011. Forages, cover crops and related shoot and root additions in no-till rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. *Soil and Tillage Research* 111, 208-218.

Sall, J., L. Creighton, and A. Lehman. 2005. *JMP start statistics: A guide to statistics and data analysis using JMP and JMP IN software*. Duxbury Press, Cary, NC.

Six, J., Elliott, E. T., Paustian, K., Doran, J.W. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:1367-1377.

Six, J., Paustian, K.; Elliott, E. T.; Combrink, C. 2000. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:681-689.

Spargo, J. T., Alley, M. M., Follett, R. F., Wallace, J. V. 2008. Soil carbon sequestration with continuous no-till management of grain cropping systems in the Virginia Coastal Plain. *Soil and Tillage Research* 100, 133-140.

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

Stewart, C. E., Paustian, K., Conant, R. T., Plante, A. F., Six, J. 2009. Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 357-366.

Tivet, F., Sá, J. C .M., Lal, R., Briedis, C., Borszowski, P. R., Santos, J. B., Farias, A., Hartman, D. C., Nadolny Junior, M., Bouzinac, S., Seguy, L. 2013. 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 and Tillage Research* 26, 203-218.

Tormena, C. A., Friedrich, R., Pintro, J. C., Costa, A. C. S., Fidalski, J. 2004. Soil physical properties and organic carbon stratification rate in an oxisol after ten years under two different soil management systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 28, 1023-1031. (In portuguese)

Vezzani, F. M., Mielniczuk, J. An overview of soil quality. 2009. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33, 743–755.

Vieira, F. C. B., Bayer, C., Zanatta, J.A., Dieckow, J., Mielniczuk, J., HE, Z.L. 2007. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. *Soil and Tillage Research* 96, 195–204.

Vieira, F. C. B., Bayer, C., Zanatta, J. A., Mielniczuk, J., Six, J. 2009. Building Up Organic Matter in a Subtropical Paleudult under Legume Cover-Crop-Based Rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73, 1699-1706.

White, P., Rice, C. W. 2009. Tillage effects on microbial and carbon dynamics during plant residue decomposition. *Soil Biology and Biochemistry* 73, 138-145.

5 PERSPECTIVAS DE ESTUDOS FUTUROS

Esta tese gerou resultados importantes para o avanço nos estudos envolvendo o acúmulo e redistribuição de carbono ao longo do perfil em solos subtropicais sob longa duração de plantio direto. Esses avanços servem de estímulo para a realização de novos estudos que visem aprimorar ainda mais esse campo do conhecimento. Alguns dos itens que merecem atenção neste avanço e que poderão servir de base para estudos futuros estão brevemente listados a seguir:

- a) Entender quais são os mecanismos de estabilização do carbono profundo.
- b) Entender qual relação entre atributos físicos, químicos e mineralógicos com a estabilização do carbono no perfil.
- c) Entender como se procede a migração do carbono no perfil do solo.
- d) Caracterização das “Tongues” (MOS em zonas visualmente identificáveis em forma de línguas) na camada profunda (0,60-1,0 m) em solos subtropicais.

APÊNDICE

Apêndice A – Análise de Componentes principais (ACP)

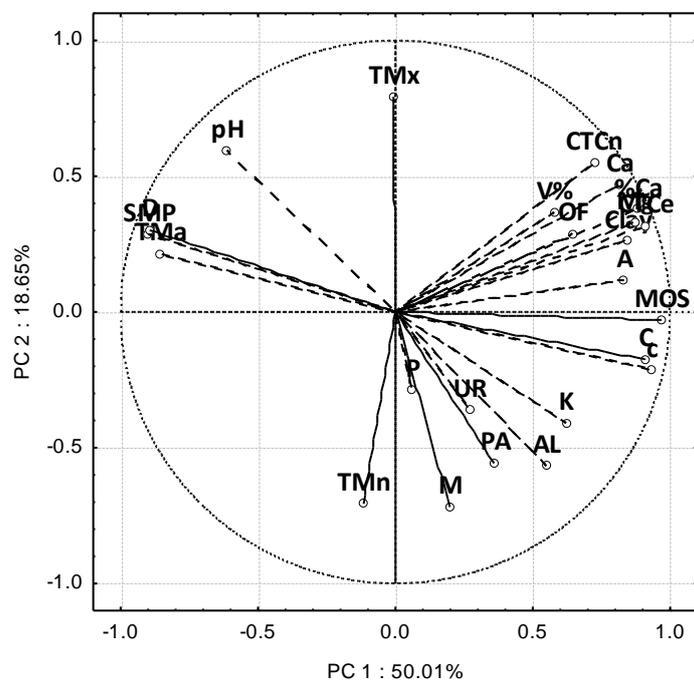


Figura 1 – Projeção das variáveis descritoras de SPD (0-15 cm), em função dos CPs 1 e 2.

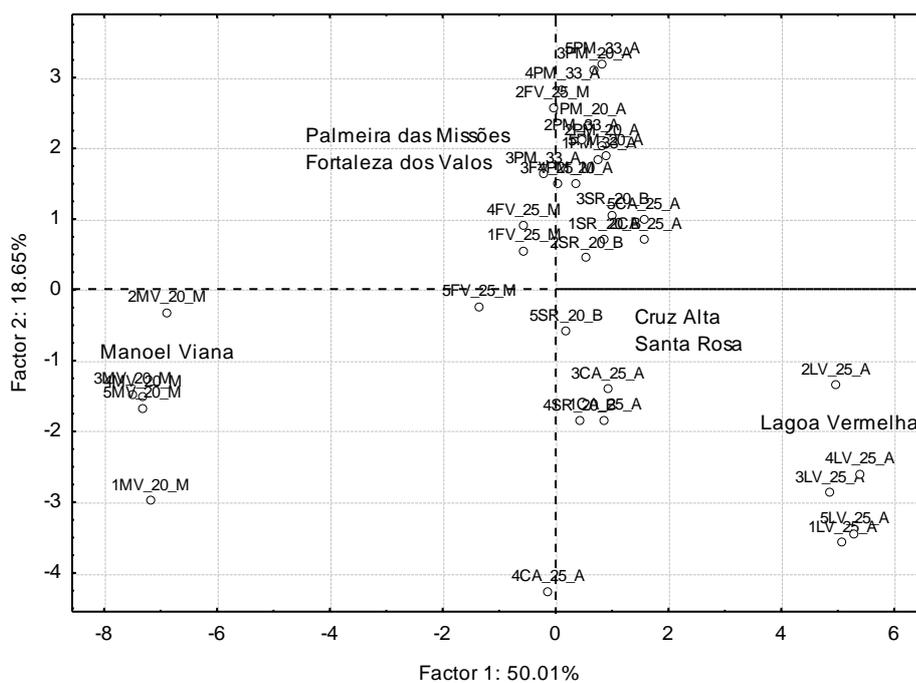


Figura 2 – Projeção dos casos de SPD (0-15 cm), em função dos CPs 1 e 2.

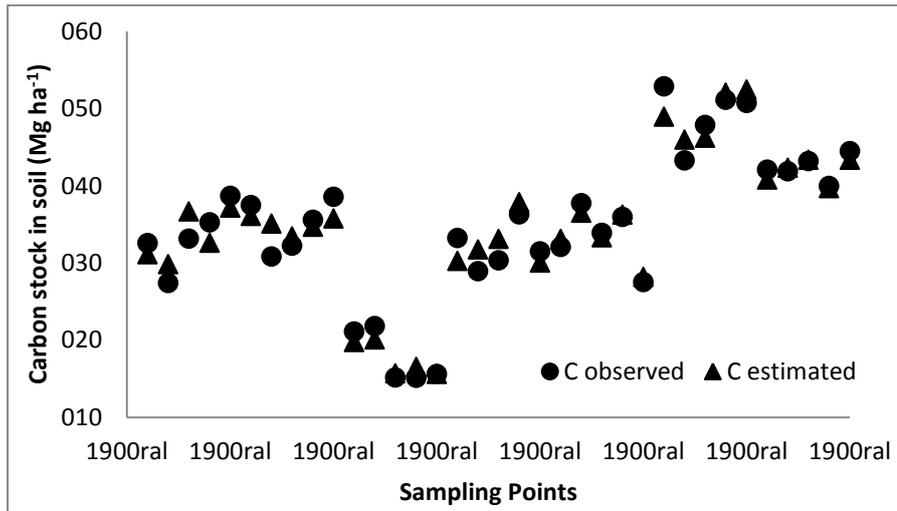


Figura 3 – Valores observados e estimados do estoque de carbono no solo na camada de 0-15 cm em SPD no Rio Grande do Sul.

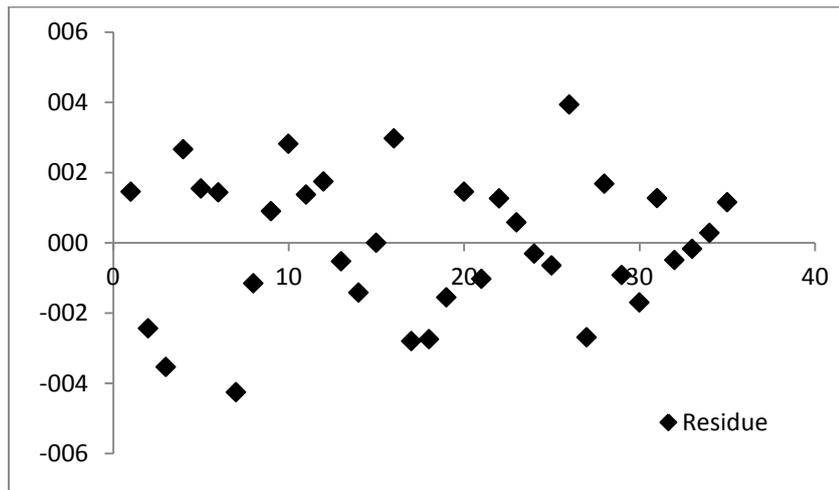


Figura 4 – Dispersão gráfica dos resíduos para estimativas do estoque de carbono no solo na camada de 0-15 cm em SPD no Rio Grande do Sul.

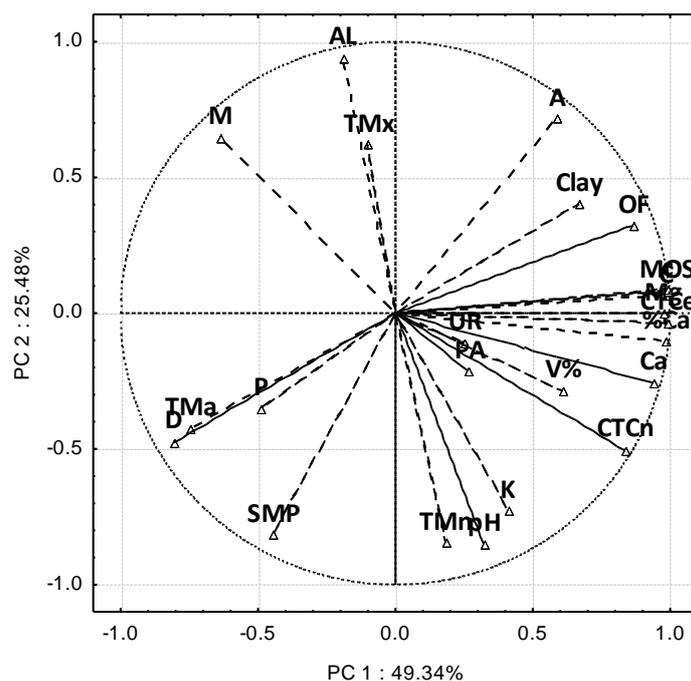


Figura 5 – Projeção das variáveis descritoras de campo nativo (0-15 cm), em função dos CPs 1 e 2.

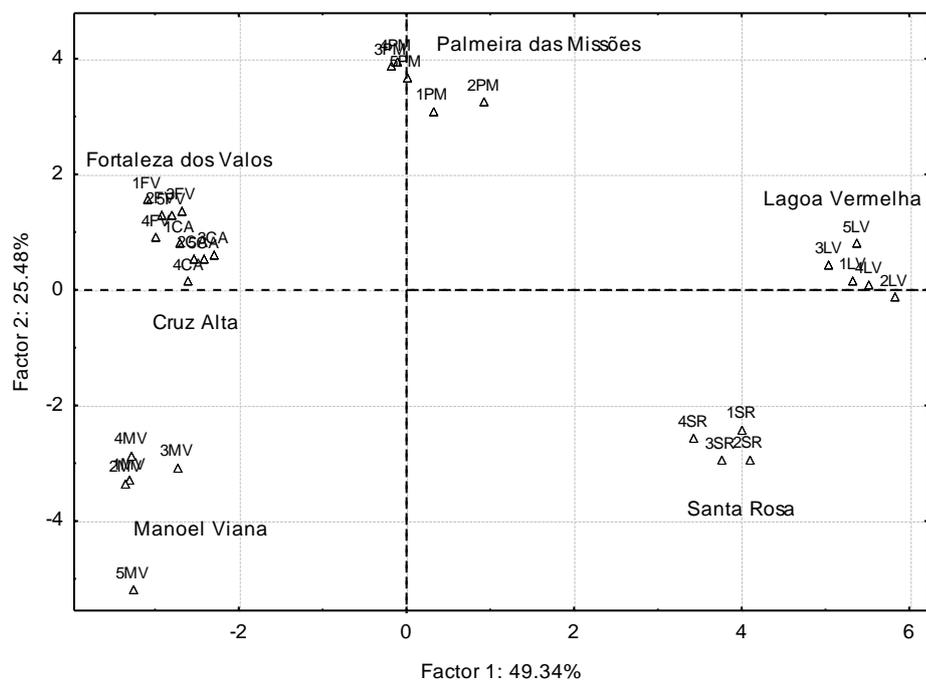


Figura 6 – Projeção dos casos de campo nativo (0-15 cm), em função dos CPs 1 e 2.

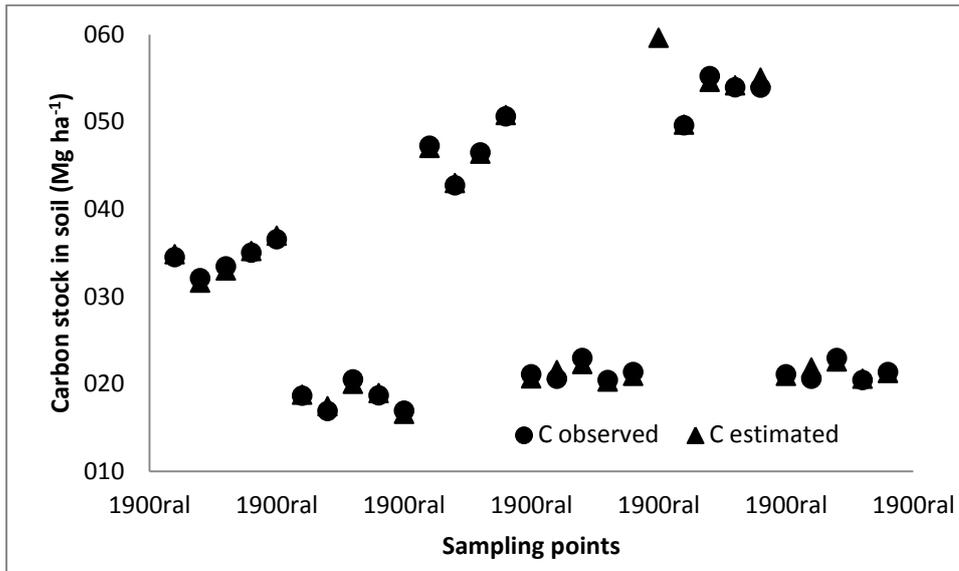


Figura 7 – Valores observados e estimados do estoque de carbono no solo na camada de 0-15 cm em campo nativo no Rio Grande do Sul.

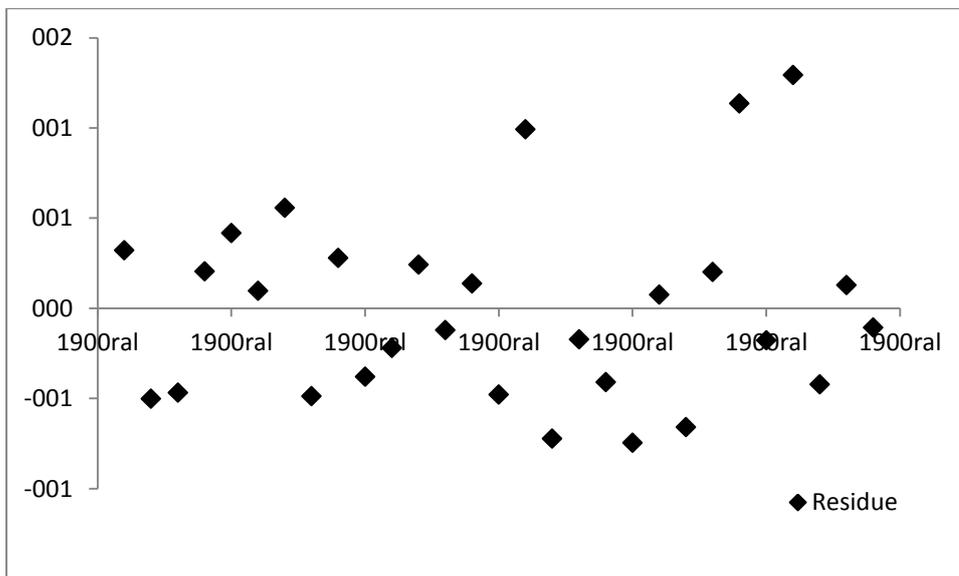


Figura 8 – Dispersão gráfica dos resíduos para estimativas do estoque de carbono no solo na camada de 0-15 cm em campo nativo no Rio Grande do Sul.

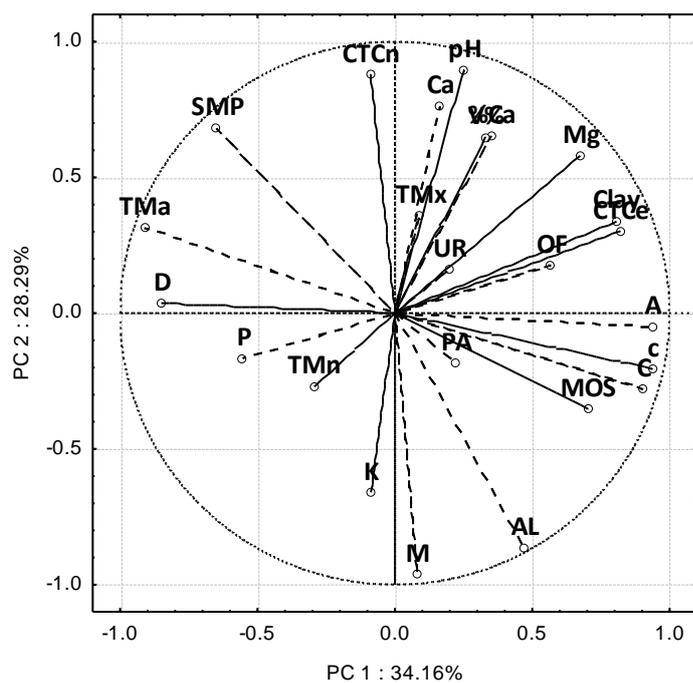


Figura 9 – Projeção das variáveis descritoras de SPD (60-100 cm), em função dos CPs 1 e 2

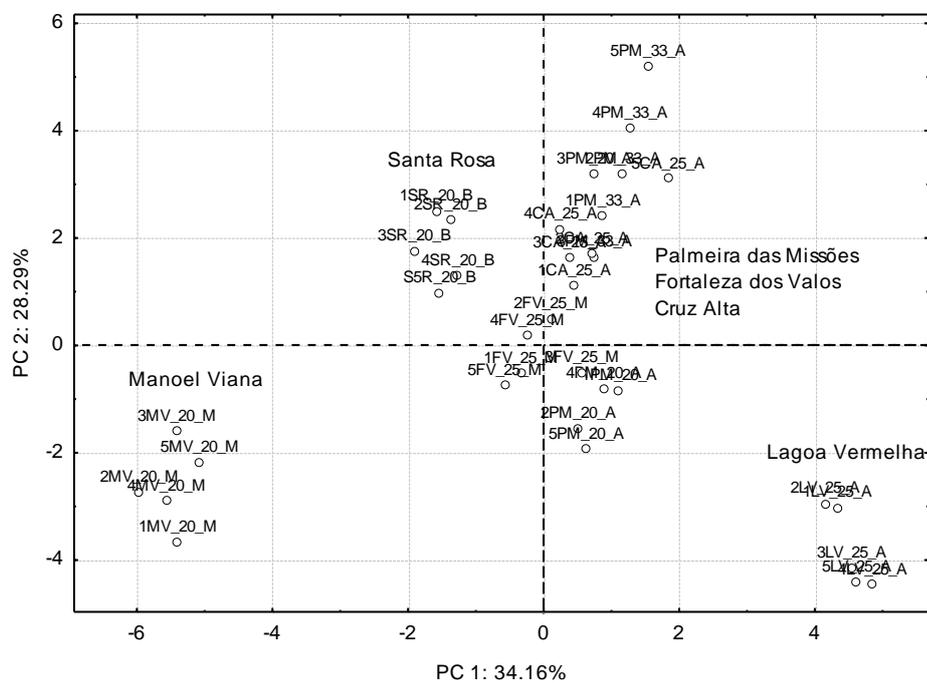


Figura 10 – Projeção dos casos de SPD (60-100 cm), em função dos CPs 1 e 2.

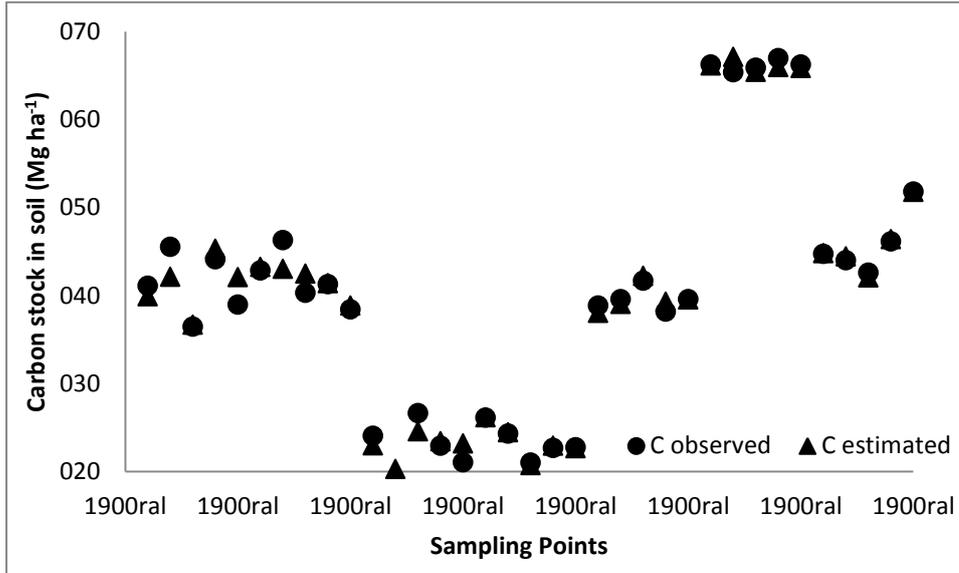


Figura 11 – Valores observados e estimados do estoque de carbono no solo na camada de 60-100 cm em SPD no Rio Grande do Sul.

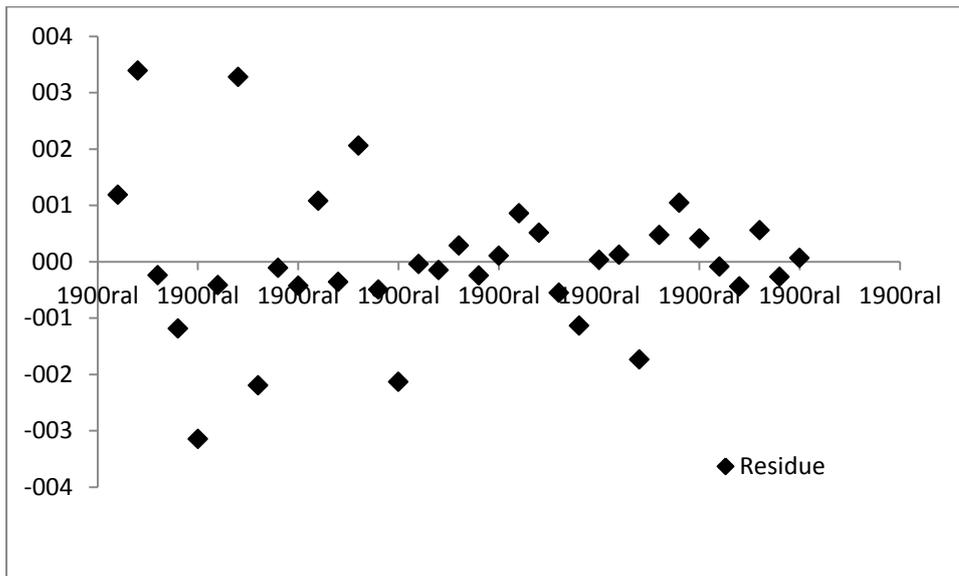


Figura 12 – Dispersão gráfica dos resíduos para estimativas do estoque de carbono no solo na camada de 60-100 cm em SPD no Rio Grande do Sul.

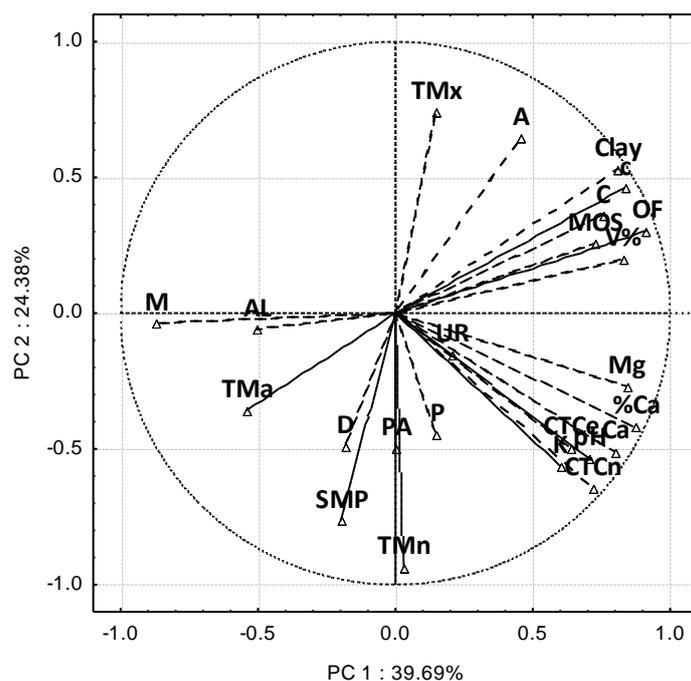


Figura 13 – Projeção das variáveis descritoras de campo nativo (60-10 cm), em função dos CPs 1 e 2.

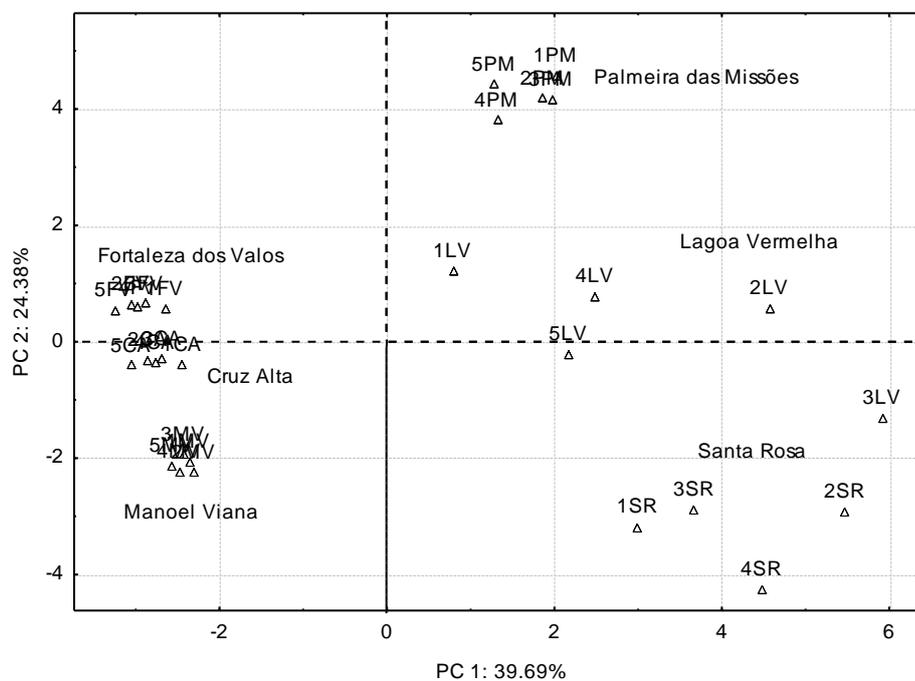


Figura 14 – Projeção dos casos de SPD (60-100 cm), em função dos CPs 1 e 2.

