



MICHELE KARINA COTTA WALTER

**ANÁLISE DO ESTOQUE DE CARBONO EM
SISTEMAS AGRÍCOLAS E FLORESTAIS EM PASSO
FUNDO E FREDERICO WESTPHALEN, RS**

CAMPINAS

2012



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

MICHELE KARINA COTTA WALTER

**ANÁLISE DO ESTOQUE DE CARBONO EM
SISTEMAS AGRÍCOLAS E FLORESTAIS EM PASSO
FUNDO E FREDERICO WESTPHALEN, RS**

Orientador: Mara de Andrade Marinho

Co-Orientador: Jurandir Zullo Junior

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, na área de concentração de Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável.

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE
DEFENDIDA PELA ALUNA MICHELE KARINA COTTA WALTER
E ORIENTADA PELA PROFA. DRA. MARA DE ANDRADE MARINHO**

Assinatura do Orientador

CAMPINAS

2012

iii

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

W171a Walter, Michele Karina Cotta
Análise do estoque de carbono em sistemas agrícolas e florestais em Passo Fundo e Frederico Westphalen, RS / Michele Karina Cotta Walter. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Mara de Andrade Marinho.
Coorientador: Jurandir Zullo Junior.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Florestas. 2. Biomassa. 3. Sistemas agrícolas. 4. Avaliação econômica. 5. Carbono. I. Marinho, Mara de Andrade, 1957-. II. Zullo Junior, Jurandir. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Título em Inglês: Carbon stocks analysis in agricultural and forestry systems in Passo Fundo and Frederico Westphalen, RS

Palavras-chave em Inglês: Forest, Biomass, Agricultural systems, Economic evaluation, Carbon

Área de concentração: Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável

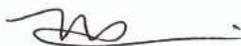
Titulação: Doutora em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Mara de Andrade Marinho, Laércio Antônio Gonçalves
Jacovine, Ana Maria Heuminski de Ávila, Ricardo
Ribeiro Alves, Giampaolo Queiroz Pellegrino

Data da defesa: 23-11-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

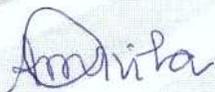
Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Michele Karina Cotta Walter**, aprovada pela Comissão Julgadora em 23 de novembro de 2012, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



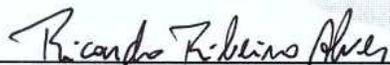
Profa. Dra. Mara de Andrade Marinho – Presidenta e Orientadora
Feagri/Unicamp



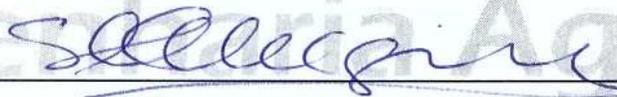
Prof. Dr. Laércio Antonio Gonçalves Jacovine - Membro Titular
UFV



Dra. Ana Maria Heuminski de Ávila – Membro Titular
Cepagri/Unicamp



Prof. Dr. Ricardo Ribeiro Alves - Membro Titular
Unipampa



Dr. Giampaolo Queiroz Pellegrino - Membro Titular
Embrapa/CNPTIA

*À MAIOR BENÇÃO DE DEUS NA MINHA
VIDA: PEDRO COTTA WALTER*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora por terem me proporcionado, saúde, sabedoria, discernimento e perseverança para concretização do doutorado.

À Faculdade de Engenharia Agrícola (Feagri) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) pela oportunidade de cursar o Doutorado e pela qualificação proporcionada.

À minha orientadora e amiga, Mara de Andrade Marinho, pela orientação e pela confiança em mim depositada.

Ao meu co-orientador Jurandir Zullo Jr. pela amizade, pelo incentivo e pelas valiosas sugestões.

Ao pesquisador da Embrapa Trigo José Eloir Denardin pela ajuda para realização da parte experimental, pelas sugestões e pela amizade.

Aos membros da banca de defesa Ana Maria de Ávila, Giampaolo Pellegrino, Laércio Jacovine e Ricardo Alves pela participação e valiosas contribuições.

Aos pesquisadores Carlos Alberto Flores (Embrapa Clima Temperado), Balbino Evangelista (Embrapa Cerrado) e Edilson Batista de Oliveira (Embrapa Floresta) pelas contribuições.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de pesquisa concedida.

Ao Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (Cepagri) da Unicamp pelo apoio estrutural e financeiro dispensado ao projeto.

À Embrapa Trigo, em nome dos Srs. Gilberto Cunha e João Leonardo Pires por conceder apoio estrutural, técnico e financeiro para realização da parte experimental desta pesquisa.

Ao FAEPEX /Unicamp pelo apoio financeiro concedido ao projeto.

À Technische Universität München (TUM) pela oportunidade de cursar o doutorado sanduíche.

Ao Programa de Cooperação Internacional Eubranex – Erasmus Mundus pela bolsa de estudos concedida.

Aos meus orientadores alemães Prof. Dr. Michael Weber, Prof. Dr. Bernard Stim e Prof. Dr. Thomas Knock pela orientação e receptividade.

Ao Dr. Hilton Silveira Pinto e Dr. Eduardo Assad pela amizade e pelos sábios conselhos.

Ao professor Edson Matsura pela amizade e pelas trocas de idéias ao longo do curso.

Ao professor Gustavo Pilau pelo suporte técnico para realização do trabalho de campo em Frederico Westphalen.

Ao Sr. Valdir Batalin por ceder suas lavouras de grãos para realização do experimento.

Aos funcionários e ex-funcionários da pós-graduação da Feagri pela competência e pelo suporte técnico dispensado.

Aos funcionários do Cepagri pelo suporte técnico e agradável convivência no dia a dia.

Ao funcionário da Embrapa Trigo Luiz Medeiros pela assistência prestada durante as coletas de dados em campo.

À equipe de campo da Embrapa Trigo e aos funcionários do laboratório de solos pela incansável ajuda com a parte experimental e realização das análises.

Aos funcionários do laboratório de solos da Feagri/Unicamp e ao Agmon Rocha (Labgeo) pelas contribuições e suporte técnico concedido.

Às minhas amigas da pós-graduação Rachel Boschi, Priscila Coltri, Marina Miranda, Kelly Tonello, Ana Ávila, Rojane Kleteck, Carmelita Ribeiro, Cintia Maluf, Laura Simões, Renata Gonçalves e Luciana Alvim pelo companheirismo e agradável convivência no dia a dia.

Aos amigos lá de fora, Ximena Palomeque, Baltazar Calvas, Violeta Amaro e Patrick Hildebrandt pela amizade e companhia durante a estadia na Alemanha.

À Maria Tereza Clerici, João Clerici e Rafael Clerici pelas estadias concedidas em Campinas.

À minha família, em especial à minha mãe Vicência Cotta e a minha irmã Valdelice Carneiro por estarem sempre ao meu lado e pela ajuda com o Pedro.

Às minhas sobrinhas e sobrinhos pelos agradáveis momentos de descontração.

Ao meu marido, Eduardo Walter, pelo companheirismo, pelo incentivo e apoio incondicional a todo o momento.

A todos aqueles que participaram desta etapa da minha vida e contribuíram pelo êxito deste trabalho.

“Senhor, concede-me coragem de mudar as coisas que eu posso mudar, serenidade para aceitar as coisas que eu não posso mudar, e sabedoria para estabelecer a diferença entre elas.”

– Oração da Serenidade –

RESUMO

No estado do Rio Grande do Sul a deficiência hídrica associada às limitações da qualidade física dos solos tem comprometido o rendimento da cultura da soja, resultando na maioria das vezes em prejuízos econômicos ao produtor e degradação dos recursos naturais. Os objetivos deste estudo foram avaliar a aptidão edafoclimática de terras no RS ocupadas com sistemas de sucessão e de rotação de culturas (soja, trigo, milho, ervilhaca, aveia e sorgo), assim como analisar a viabilidade econômica da conversão dessas áreas em florestas, com geração de créditos de carbono. A adequação do uso atual das terras foi efetuada a partir da avaliação da aptidão agrícola das terras. A contabilização do estoque de carbono nas culturas agrícolas foi realizada de forma direta, por meio de coleta de dados em área experimental da Embrapa Trigo, em Passo Fundo (PF) – RS, e em áreas comerciais de grãos, em Frederico Westphalen (FW) – RS. O estoque de carbono florestal foi estimado considerando cenários simulados com *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* L. usando o modelo de contabilização de carbono CO₂Fix. A análise econômica foi conduzida aplicando-se os critérios de avaliação econômica VPL, TIR e B/C. Os resultados demonstraram que o uso atual da maioria das terras em PF (84%) é adequado e está de acordo com a aptidão agrícola. Entretanto, em FW cerca de 27% das terras estão sendo utilizadas acima da sua capacidade suporte. As áreas avaliadas em PF apresentaram maior capacidade de estocagem de carbono tanto nos cenários agrícolas quanto nos florestais. As terras em FW apresentaram alta incidência e susceptibilidade à degradação, principalmente por erosão. O cenário de cultivo de eucalipto com rotação de sete anos e três ciclos de corte, manejado para produção de madeira para celulose foi o que apresentou maior capacidade para geração de créditos de carbono. Dentre os cenários manejados para produção de madeira serrada, o cultivo do pinus com rotação de 21 anos e dois desbastes proporcionou o maior número de créditos de carbono. A análise econômica demonstrou maior viabilidade dos sistemas florestais comparativamente aos sistemas de sucessão de culturas trigo/soja e trigo/soja - trigo/soja - trigo/milho atualmente implantados nas áreas estudadas. A inclusão de créditos de carbono em projetos de conversão de áreas agrícolas em florestais pode resultar em aumento da rentabilidade em aproximadamente 14% para o cenário com pinus e 15% e 7% para o cenário com eucalipto manejado para serraria e celulose, respectivamente. Conclui-se que nas áreas estudadas a conversão dos sistemas de sucessão e rotação de grãos em floresta de eucalipto ou pinus com a geração de créditos de carbono constitui alternativa viável para investimentos de médio e longo prazos.

Palavras-chave: soja, floresta, avaliação de terras, avaliação econômica, créditos de carbono.

ABSTRACT

In the state of Rio Grande do Sul (RS) - Brazil, water deficiency and poor physical soil quality decrease the soybean productivity and, in the majority of the cases, cause not only economic losses to the producer but also degradation of the natural resources. The objectives of this study were to evaluate the edaphoclimatic suitability of lands in RS occupied with succession systems and crop rotation (soybean, maize, wheat, vetch, oats and sorghum), as well as analyze the economic and environmental viability of converting these areas in forests, with the generation of carbon credits. The suitability of land use was assessed using the methodology "Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras". The accounting of carbon stock in the crops was conducted in a direct way, by collecting data in the experimental area of Embrapa Wheat, in Passo Fundo (PF) - RS, and in commercial areas of grains in Frederico Westphalen (FW) - RS. The carbon stock was estimated in simulated forest scenarios with *Eucalyptus grandis* and *Pinus taeda* using the carbon accounting model CO₂Fix. The economic analysis was conducted by applying the criteria of economic evaluation NPV, IRR, and B/C. The results showed that the current use of most land in PF (84%) is in accordance with its agricultural potential. However, in FW 27% of the land is being used above its carrying capacity. The evaluated areas in PF showed higher carbon storage capacity in agricultural and forest scenarios. The areas in FW showed a high incidence and susceptibility of environmental degradation, especially with regard to the risk of erosion. The scenario of growing *Eucalyptus grandis* with seven years of rotation and three cycles of cutting, managed for pulpwood production, showed the greatest capacity to generate carbon credits. Among the scenarios handled for sawn timber production, the cultivation of pinus with rotation of 21 years and two thinnings resulted in the highest number of carbon credits. The economic analysis showed higher viability of forest systems compared to systems of succession planting wheat / soybeans and wheat / soybean - wheat / soybean - wheat / maize currently deployed in the areas studied. The inclusion of carbon credits in projects for converting farmland into forest can result in increased profitability. It is approximately 14% for the scenario with *Pinus taeda* and 15% and 7% in the scenario with *Eucalyptus grandis* for sawn timber and pulp respectively. The conclusion is that in the areas studied the conversion of succession and rotation of grain into eucalyptus or pinus forest with the generation of carbon credits is a viable alternative to investments in medium and long term.

Keywords: soybean, forest, land evaluation, economic evaluation, carbon credits.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4
CAPÍTULO 1	6
APTIDÃO EDAFOCLIMÁTICA PARA A CULTURA DA SOJA E OUTRAS CULTURAS DE GRÃOS NOS MUNICÍPIOS DE PASSO FUNDO E FREDERICO WESTPHALEN, RS6	
1. INTRODUÇÃO.....	6
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	9
2.1 Área de estudo	9
2.2 Avaliação agroclimática para a cultura da soja	17
2.3 Avaliação da aptidão agrícola das terras	18
2.4 Avaliação da adequação do uso atual das terras.....	20
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
3.1 Uso atual das terras.....	22
3.2 Caracterização agroclimática para a cultura da soja.....	24
3.3 Avaliação da aptidão agrícola das terras	33
3.4 Adequação do uso das terras	50
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
CAPÍTULO 2	68
ESTIMATIVA DO ESTOQUE DE CARBONO EM ÁREA EXPERIMENTAL E EM ÁREA DE PRODUÇÃO COMERCIAL DE GRÃOS NO RIO GRANDE DO SUL	
1. INTRODUÇÃO.....	68
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	71
2.1 Área de Estudo	71
2.2 Estimativa do estoque de carbono na vegetação e no liter	74
2.3 Estimativa do estoque de carbono no solo	76
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
3.1 Estoque de biomassa seca e de carbono na vegetação e no liter	78
3.2 Estoque de carbono orgânico no solo.....	87
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
CAPÍTULO 3	102
CONTABILIZAÇÃO DOS ESTOQUES DE CARBONO EM CENÁRIOS FLORESTAIS COM <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus taeda</i> NO RIO GRANDE DO SUL	
1. INTRODUÇÃO.....	102
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	106
2.1 Área de estudo	106
2.2 Simulação de cenários florestais	106
2.3 Prognose de crescimento e de produção nos cenários florestais	108
2.4 Aplicação do modelo CO ₂ Fix V3.1 para estimar estoques de carbono na biomassa arbórea e no solo.....	109
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	114

3.1 Prognose de crescimento e de produção nos cenários florestais gerados pelos programas SisEucalipto e SisPinus	114
3.2 Volume de madeira, estoques de biomassa e de carbono estimados pelo CO ₂ Fix para cenários com <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus taeda</i>	121
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	142
CAPÍTULO 4	150
AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE SISTEMAS AGRÍCOLAS E FLORESTAIS INCLUINDO A GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO	
1. INTRODUÇÃO.....	150
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	152
2.1 Área de estudo	152
2.2 Geração de créditos de carbono e simulações de cenários florestais	152
2.3 Avaliação econômica.....	155
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	160
3.1 Estimativa das Reduções Certificadas de Emissões (RCE).....	160
3.2 Avaliação econômica dos cenários com <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus taeda</i>	161
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	166
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	167
CONCLUSÃO GERAL	175

INTRODUÇÃO GERAL

A utilização das terras de forma inadequada, sem levar em conta suas limitações e potencialidades, é uma das principais causas da degradação dos recursos naturais, podendo ocasionar perda da capacidade produtiva e consequentes prejuízos econômicos ao agricultor (PEREIRA et al., 2006). Promover o uso da terra com sustentabilidade, de modo a obter os máximos benefícios sem degradá-la e garantir sua conservação para gerações futuras, tornou-se paradigma fundamental do agronegócio brasileiro.

O estado do Rio Grande do Sul (RS) apresenta uma economia tipicamente agrícola, baseada principalmente na produção de grãos e na pecuária. Em 2011, foi responsável por 17% da produção nacional de grãos. Em termos de importância econômica destacam-se as culturas de soja e de arroz irrigado, sendo que as demais apresentam importância como opções de rotação de culturas, culturas de subsistência e associadas a sistemas de produção animal. Atualmente, o estado é o terceiro maior produtor de soja do Brasil e detém aproximadamente 15% da produção nacional. Nos últimos anos, a área cultivada com soja tem se aproximado de quatro milhões de hectares, com produção média de sete milhões de toneladas. Apesar da expressão econômica e da tradição cultural dos municípios e dos agricultores gaúchos em cultivar a soja, o estado apresenta baixos índices de produtividade. A produtividade média de 1.800 kg ha⁻¹ é baixa, quando comparada, por exemplo, aos índices obtidos nos estados do Paraná e do Mato Grosso, de 2.800 e 3.000 kg ha⁻¹, respectivamente (IBGE, 2011).

Uma das principais causas do baixo índice de produtividade da soja no RS tem sido atribuída à variação da disponibilidade hídrica para a cultura (BERLATO; FONTANA, 2003; MATZENAUER et al., 1998). Embora o estado apresente precipitação pluvial equitativamente distribuída nas quatro estações do ano (24% no verão, 25% no outono, 25% no inverno e 26% na primavera) a chuva normal de verão, em geral, não é suficiente para atender as necessidades hídricas da soja (BERLATO, FONTANA, 2003; MATZENAUER et al., 1998). Além disso, o déficit hídrico coincide com períodos críticos do ciclo fenológico, correspondentes às fases de floração e de enchimento de grãos, influenciando direta e negativamente a produção.

Áreas atualmente ocupadas com cultivo de grãos no RS têm demonstrado fragilidade e alta susceptibilidade à degradação ambiental. A região noroeste do estado, por exemplo, é caracterizada como área favorável e representativa da produção de soja segundo o zoneamento agroclimático (BERLATO, FONTANA, 1999; BRASIL, 2008). Entretanto, deficiência hídrica em períodos críticos do desenvolvimento dessa cultura, associada à degradação da qualidade estrutural do solo pelo manejo agrícola ou ao uso da terra em desacordo com sua capacidade têm ocasionado quebras sucessivas de produtividade e recorrentes prejuízos econômicos aos produtores.

Diante desse contexto, observam-se tendências de mudança nos sistemas de uso da terra, em que os aspectos relativos à sustentabilidade ambiental e à criação de novas alternativas sócio-econômicas vêm assumindo importância cada vez maior para os produtores daquela região. Estudos realizados por Dossa et al. (2000) e Ribaski et al. (2005) no estado do Rio Grande do Sul constataram competitividade e viabilidade de sistemas florestais, agroflorestais e silvipastoris quando comparados com atividades de produção agrícola ou pecuária.

Com o advento de novos instrumentos de política climática global, tais como o Protocolo de Kyoto, estabelecido pela Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, e o *Voluntary Carbon Standard – VCS*, que permitem a geração e comercialização de créditos de carbono por meio de reflorestamentos, o plantio de florestas passou a ganhar visibilidade no sentido de contribuir para a remoção de gases de efeito estufa (GEE) e para a geração de créditos de carbono, os quais podem ser comercializados e gerar renda adicional. Sendo assim, a implantação de sistemas florestais para esta finalidade constitui uma alternativa de uso da terra promissora para gerar tanto benefícios econômicos quanto ambientais.

A elaboração de um projeto florestal para geração de créditos de carbono não é uma tarefa simples de ser realizada e requer o desenvolvimento de diversos procedimentos, sendo alguns deles a estimativa das remoções líquidas de GEE na linha de base¹, no cenário de projeto², bem como a estimativa das Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) conhecidas popularmente como “créditos de carbono”.

¹ São as remoções de GEE que ocorrem caso a atividade florestal para créditos de carbono não seja implantada.

² É o cenário representado pela implantação da floresta para emissão de créditos de carbono.

Estimativas indicam que os plantios florestais poderão mitigar adicionalmente 1-2 GtC por ano entre 1995 e 2050 (BROWN et al, 1996; KAUPPI et al., 2001). No entanto, alcançar esta mitigação de carbono exigirá, entre outras coisas, a adoção de métodos precisos para avaliar a dinâmica dos fluxos e armazenamento de carbono nas diferentes espécies, sob diferentes regimes de manejo, além da adequada elaboração, implantação e monitoramento dos projetos de florestamento e reflorestamento, de acordo com os princípios que regem as políticas intergovernamentais de mudança climática (UNFCCC, 2003; 2007; IPCC, 2003).

A possibilidade de agregar as receitas advindas dos créditos de carbono ao sistema florestal é considerada um atrativo para a adoção desta atividade. Entretanto, para que se possa fornecer, aos produtores de soja, informações consistentes, que os auxiliem na tomada de decisão quanto a conversão das áreas produtoras em sistemas florestais, é necessária uma análise de viabilidade que contemple as variáveis econômicas e ambientais.

Deste modo, a hipótese testada neste trabalho foi que a conversão de áreas de produção de soja, sujeitas a quebras de produtividade no RS, em florestas comerciais com a inclusão de créditos de carbono constitui uma alternativa viável sob os pontos de vista econômico e ambiental.

A fim de averiguar a hipótese descrita acima os seguintes objetivos foram os definidos:

- Avaliar a aptidão edafoclimática para a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merr.) e outros grãos nos municípios de Passo Fundo e de Frederico Westphalen no RS;
- Estimar o estoque de carbono em sucessão e rotação de culturas de grãos, manejados sob sistema plantio direto, em área experimental e em áreas de produção comercial de grãos;
- Aplicar o modelo CO₂Fix V3.2 para quantificar o estoque de carbono na vegetação e no solo em cenários florestais passíveis de implantação nos municípios de Passo Fundo e de Frederico Westphalen;
- Proceder a uma avaliação econômica comparativa dos sistemas de sucessão, rotação de culturas e sistemas florestais com espécies de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* tomando como referência os dois municípios estudados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERLATO, M. A.; FONTANA D. C. **El Niño e La Niña: Impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul.** Aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 10 p.

BERLATO, M. A.; FONTANA D. C. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, n.1, p.119-125, 1999.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Portaria nº 124 de 27 de junho de 2008. Zoneamento agrícola para a cultura da soja no estado do RS/Safra 2008/2009. Disponível em < <http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-agricola/portarias-segmentadas-por-uf>>. Acesso em: 5 nov. 2008.

BROWN, S.; SATHAYE, J.; CANNEL, M.; KAUPPI, P. Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. In: WATSON, R. T., ZINYOWERA, M. C., MOSS, R. H. (Ed.). **Climate Change 1995, Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses.** Cambridge University: Cambridge, 1996. p. 773-797. Report of Working Group II, Assessment Report, IPCC.

DOSSA, D.; CONTO, A. J.; RODIGHERI, H. R.; HOEFLICH, V. A. **Aplicativo com análise de rentabilidade para sistemas de produção de florestas cultivadas e de grãos.** Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 59 p. (Documentos, 39).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agrícola Municipal (1990 - 2010). SIDRA: Agricultura. 2011. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 2 out. 2011.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry.** [PENMAN, J.; GYTARSKY, M.; HIRAISHI, T.; KRUG, T.; KRUGER, D.; PIPATTI, R.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE K.; WAGNER, F.(Ed.)]. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2003. National Greenhouse Gas Inventories Programme. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2008.

MATZENAUER, R.; BARNI, N. A.; MACHADO, F. A.; ROSA, F. S. Análise agroclimática das disponibilidades hídricas para a cultura da soja na região do Planalto Médio. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 2, p. 263-275, 1998.

PEREIRA, L. C.; DA SILVEIRA M. A.; LOMBARDI NETO, F. **Agroecologia e aptidão agrícola das terras:** as bases científicas para uma agricultura sustentável. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 11 p.

RIBASKI, J.; DEDECEK, R. A.; MATTEI, V. L.; FLORES, C. A.; VARGAS, A. F. C.; RIBASKI S. A. G. **Sistemas silvipastoris:** estratégias para o desenvolvimento rural

sustentável para a metade sul do estado do Rio Grande do Sul. Colombo: Embrapa Florestas. 2005. 8 p. (Comunicado Técnico, 150).

KAUPPI, P.; SEDJO, R. J.; APPS, M.; CERRI, C.; FUJIMORI, T.; JANZEN, H.; KRANKINA, O.; MAKUNDI, W.; MARLAND, G.; MASERA, O.; NABUURS, G. J.; RAZALI, W.; RAVINDRANATH, N.H. Technical and economic potential of options to enhance, maintain and manage biological carbon reservoirs and geo-engineering. In: METZ et al. (Ed.). **Mitigation**. Cambridge: Cambridge University, 2001. p. 302-343. IPCC Third assessment report.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. Decision 19/CP.9: Modalities and procedures for afforestation and reforestation project activities under the clean development mechanism in the first commitment period of the Kyoto Protocol. 2003. Disponível em: <<http://www.unfccc.int/documentation/decisions>>. Acesso em: 16 abr. 2007.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. Decision 19/CP.9: Modalities and procedures for afforestation and reforestation project activities under the clean development mechanism in the first commitment period of the Kyoto Protocol. 2003. Disponível em: <<http://www.unfccc.int/documentation/decisions>>. Acesso em: 16 abr. 2007.

CAPÍTULO 1

APTIDÃO EDAFOCLIMÁTICA PARA A CULTURA DA SOJA E OUTRAS CULTURAS DE GRÃOS NOS MUNICÍPIOS DE PASSO FUNDO E FREDERICO WESTPHALEN, RS

1. INTRODUÇÃO

A utilização das terras de forma inadequada, sem levar em conta suas limitações e potencialidades, é uma das causas principais de degradação dos recursos naturais, podendo ocasionar perda da capacidade produtiva e consequentes prejuízos econômicos aos agricultores (PEREIRA et al., 2006).

O estado do Rio Grande do Sul – RS é considerado um dos maiores produtores de soja do Brasil e, em geral, apresenta condições favoráveis a esta prática. Entretanto, em algumas regiões do estado, ocorrem quebras de produtividade dessa cultura devidas à ocorrência de estiagens, ocasionando prejuízos econômicos aos produtores.

Uma das principais causas das quebras de produtividade e dos baixos índices de produtividade da soja no RS tem sido atribuída à variação da disponibilidade hídrica para a cultura (BERLATO; FONTANA, 2003; MATZENAUER et al., 1998). O déficit hídrico coincide com períodos críticos do ciclo fenológico, correspondentes às fases de floração e de enchimento de grãos, influenciando direta e negativamente a produção.

A implementação do programa de Zoneamento Agrícola de Riscos Climáticos, a partir de 1996, pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), como instrumento principal de apoio à política de crédito e seguridade agrícola do Governo Federal, buscou reduzir as perdas causadas por adversidades climáticas na agricultura brasileira. Para isso, foram estabelecidos zoneamentos de riscos climáticos que definem, com base na escolha de culturas, ciclo de cultivares e períodos de semeadura, o nível de risco de natureza climática inerentes à atividade agrícola, em determinado local (CUNHA et al., 2001).

O zoneamento de riscos climáticos para a cultura da soja, no Brasil, tem incluído, como principais variáveis limitantes, a deficiência hídrica, a insuficiência térmica e a falta de uma estação seca na época de colheita. Especificamente para o RS, Mota et al. (1974), considerando o fotoperíodo, a temperatura e a umidade, diagnosticaram a possibilidade do

cultivo da soja em todo o estado, com exceção de pequena área no nordeste do território rio-grandense por razões de natureza térmica. Cunha et al. (2001) concluíram que há um gradiente de perda do potencial de rendimento da soja, por deficiência hídrica, com aumento da magnitude no sentido de nordeste para sudoeste, com as maiores perdas ocorrendo na metade sul e na parte oeste, comparativamente à metade ao norte e à parte leste do estado. Cunha et al. (2001) afirmam, ainda, que os municípios do estado incluídos no zoneamento não apresentam, necessariamente, o mesmo nível de potencial de rendimento, em decorrência de diferenças associadas com outras variáveis de solo, clima e manejo.

A região noroeste do RS é considerada representativa da produção de soja no estado e é classificada, conforme o zoneamento agrícola, como área preferencial para o cultivo dessa oleaginosa (BRASIL, 2008). Embora o zoneamento considere como aptos ao plantio da soja a maioria dos municípios desta região, vários estudos, dentre eles os realizados por Cunha et al. (1998), Cunha et al. (2001), Cunha et al. (2004), Matzenauer et al. (2002) e Mello et al. (2004), evidenciam que a disponibilidade hídrica limita a expressão do potencial de rendimento da soja em todo o estado, independentemente do local, do ciclo, da cultivar e da época de semeadura.

Em conjunto com os fatores climáticos, a qualidade do solo é um fator condicionante importante da produtividade. Atributos como textura, estrutura, fertilidade química, capacidade térmica e de água disponível, entre outros, são determinantes da produção agrícola, assim como o sistema ou práticas de manejo adotadas (RAMALHO FILHO; BEEK, 1995). De acordo com Matzenauer et al. (1998), práticas inadequadas de conservação do solo e baixa fertilidade contribuem para a falta de estabilidade da produção de grãos e as frustrações de safras no estado. Estudos realizados por Camargo e Alleoni (2006) e Spera et al. (2003 apud DENARDIN et al., 2008) relatam que este problema está associado também à acentuada estratificação química e física dos primeiros 20 cm do perfil de solo. A estratificação do perfil do solo, neste caso, refere-se à disponibilidade de nutrientes e condição física favorável para o desenvolvimento das raízes na camada superficial, enquanto na camada subsuperficial ocorreria a degradação da estrutura do solo por compactação, expressa pelo aumento da densidade do solo, redução da permeabilidade ao ar e à água e à elevação da resistência do solo à penetração. Para Denardin et al. (2008), a ocorrência dessa estratificação condiciona a concentração de raízes na camada superficial do solo. Assim, ocorrendo deficiência hídrica,

seja por distribuição irregular das chuvas durante o ano, seja por limitação da ascensão da água da camada subsuperficial pouco permeável para as raízes das plantas dispostas superficialmente, dá-se a quebra da produção.

Deste modo, as quebras sucessivas de produtividade da soja em algumas regiões do RS sugerem uso em desacordo com sua aptidão agrícola. Em escala regional, pode-se dizer que o comprometimento da aptidão está relacionado ao fator “clima”. Entretanto fatores locais recorrentes de práticas de manejo também podem interferir nessa aptidão, ocasionando perdas de rendimento da cultura, o que valida a busca para indicação de usos alternativos.

Assim, o objetivo deste capítulo foi avaliar a aptidão agrícola das terras para cultivo com soja (*Glicine Max* (L.) Merr.) nos municípios de Passo Fundo e Frederico Westphalen. A escolha destes municípios deveu-se ao fato que compõem a região considerada significativa de produção de soja do estado, que sofre com quebras de produtividade. Tal avaliação visa verificar a adequação do uso atual das terras e identificar usos alternativos que proporcionem uma melhor rentabilidade econômica ao produtor e, simultaneamente, a conservação dos recursos naturais.

Os objetivos específicos incluem:

- Fazer uma caracterização edafoclimática dos municípios de Passo Fundo e de Frederico Westphalen;
- Mapear o uso atual das terras nos dois municípios;
- Avaliar a aptidão agrícola das terras para cultivo da soja e outros grãos seguindo a metodologia de Ramalho Filho e Beek (1995);
- Proceder à avaliação da adequação do uso atual, comparativamente à sua aptidão agrícola.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

2.1.1 Localização e descrição

O estudo foi realizado nos municípios de Passo Fundo e Frederico Westphalen, localizados na região noroeste do Rio Grande do Sul (Figura 1). Passo Fundo pertence à região fisiográfica denominada Planalto Médio e está localizado nas coordenadas geográficas 28° 15' 39" S, 52° 24' 33" W, a uma altitude de 687 m. Frederico Westphalen, localizado a 566 m, coordenadas 27° 21' 33" S e 53° 23' 40" W, pertence à região denominada Médio Alto Uruguai. Esses municípios compõem a principal zona produtora de soja do estado, conforme definição de Berlato e Fontana (1999) e foram selecionados para este estudo devido à representatividade na produção de grãos e na ocorrência de quebras de produtividade da soja devido aos fatores edafoclimáticos.

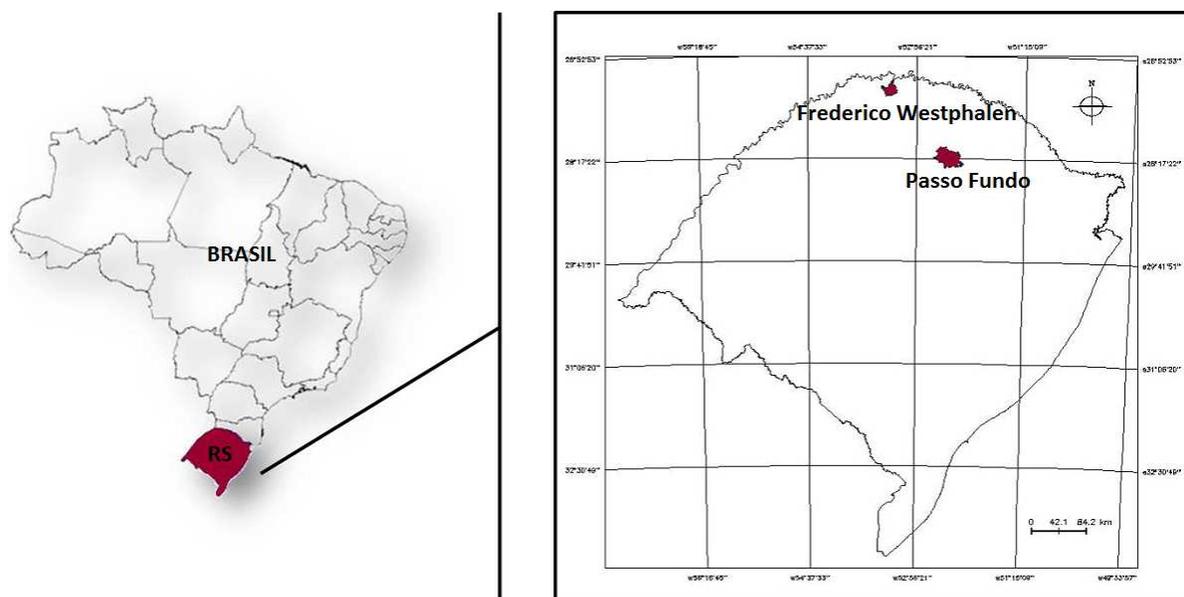


Figura 1 – Municípios componentes da área de estudo no Rio Grande do Sul.

Com o objetivo de fazer uma caracterização detalhada das características físicas dos municípios bem como de conhecer o sistema de manejo adotado, foram selecionadas áreas representativas das condições de produção de soja, que se dá em sistemas de sucessão e de rotação com outras culturas de grãos.

Em Passo Fundo, foram avaliadas as áreas de dois ensaios experimentais de longa duração da Embrapa Trigo, conduzidos sob sistema plantio direto há mais de 20 anos em área de LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico. Um dos ensaios é composto pelo sistema de rotação de culturas trigo (*Triticum aestivum*)/soja (*Glycine max* (L.) Merr.) - aveia branca (*Avena sativa*)/soja – ervilhaca (*Vicia sativa*)/sorgo (*Sorghum bicolor*) e o outro pela sucessão trigo/soja.

Em Frederico Westphalen foram avaliadas duas lavouras comerciais de grãos pertencentes a um produtor rural, estando uma delas implantada em área de CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico e outra sob LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico húmico. A lavoura implantada em área de LATOSSOLO VERMELHO vinha sendo manejada sob plantio direto há aproximadamente oito anos, enquanto a implantada sob CAMBISSOLO HÁPLICO há quatro anos. O sistema de rotação de culturas adotado nas áreas em Frederico Westphalen se constitui de trigo (*Triticum aestivum*) /soja (*Glycine max* (L.) Merr.) – trigo/soja – trigo/milho (*Zea mays*).

Os dados utilizados neste estudo correspondem aos do ano safra 2008/2009, sendo que o plantio da safra de verão foi realizado no final de 2008 e os das safras de inverno em 2009.

2.1.2 Caracterização do meio físico dos municípios de Passo Fundo e de Frederico Westphalen

Solos

A identificação dos solos nos dois municípios foi realizada utilizando o mapa exploratório de solos do projeto Radambrasil (IBGE, 1986) e complementações bibliográficas provenientes de Brasil (1973) e Streck et al. (2008) (Figuras 2 e 3).

No município de Passo Fundo foram identificadas quatro classes de solos, com predominância do LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico (LVd), distribuído em 62% da área, seguido pelo NITOSSOLO VERMELHO Distroférico típico (NVdf) em 35% da área e, em menores proporções, por LATOSSOLOS VERMELHOS Aluminoférricos húmicos (LVaf) e NITOSSOLOS BRUNOS Alumínicos típico (NBa) que juntos ocupam 2% da área (Figura 2).

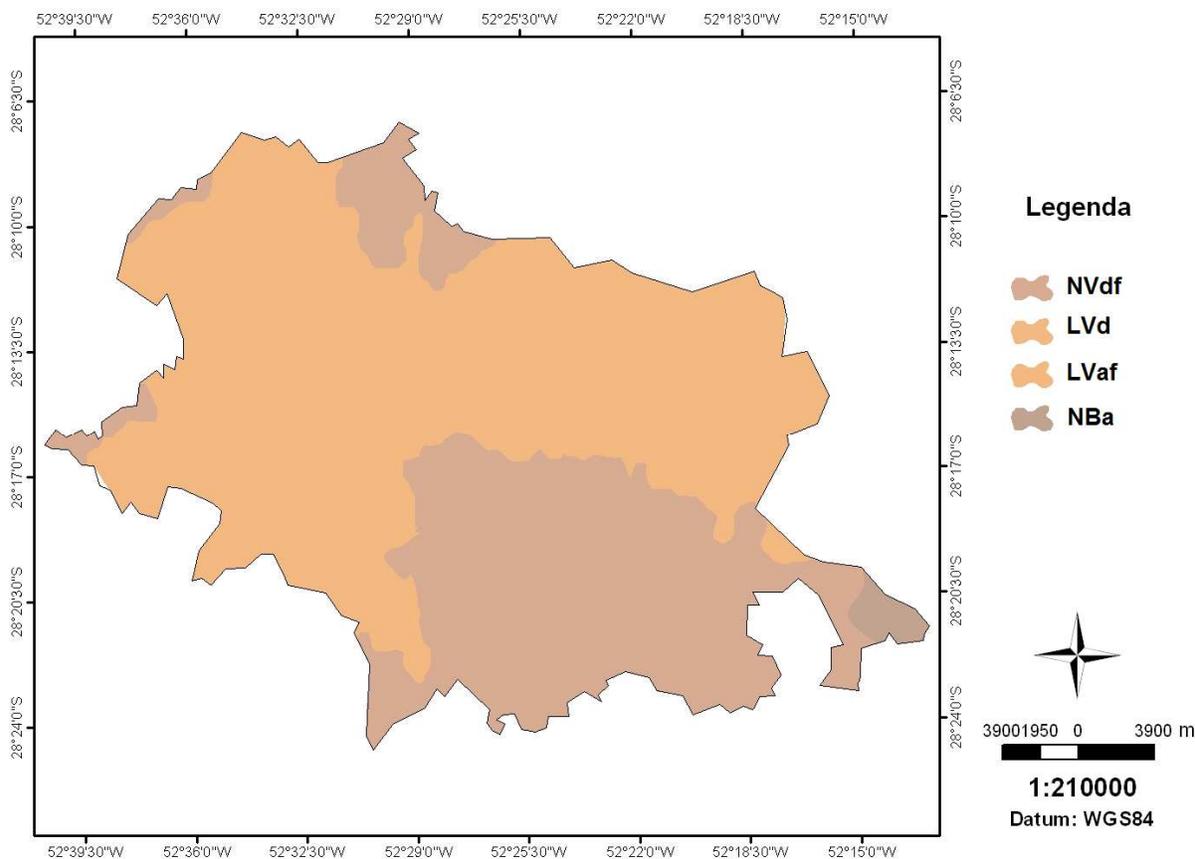


Figura 2 – Mapa pedológico do município de Passo Fundo, RS. Fonte: IBGE (1986).

A caracterização de perfis representativos dos solos de ocorrência em Passo Fundo foi feita a partir de dados provenientes de Brasil (1973), IBGE (1986) e Streck et al. (2008) e de dados levantados durante a pesquisa, sendo estes apresentados no Anexo 1. Para o LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico, predominante no município e de ocorrência na área experimental da Embrapa Trigo, foi feita uma caracterização física e química a partir de amostras coletadas em mini-trincheiras com profundidade de 30 cm, localizadas nas parcelas experimentais, conforme consta no Anexo 2.

No município de Frederico Westphalen predomina o CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico (CXve), o qual corresponde espacialmente a 68% da área municipal. Em proporções menores encontram-se os LATOSSOLOS VERMELHOS Distróferricos típicos (LVdf) com 28% e os NITOSSOLOS VERMELHOS Eutróferricos típicos (NVef) ocorrendo em apenas 4% da área (Figura 3).

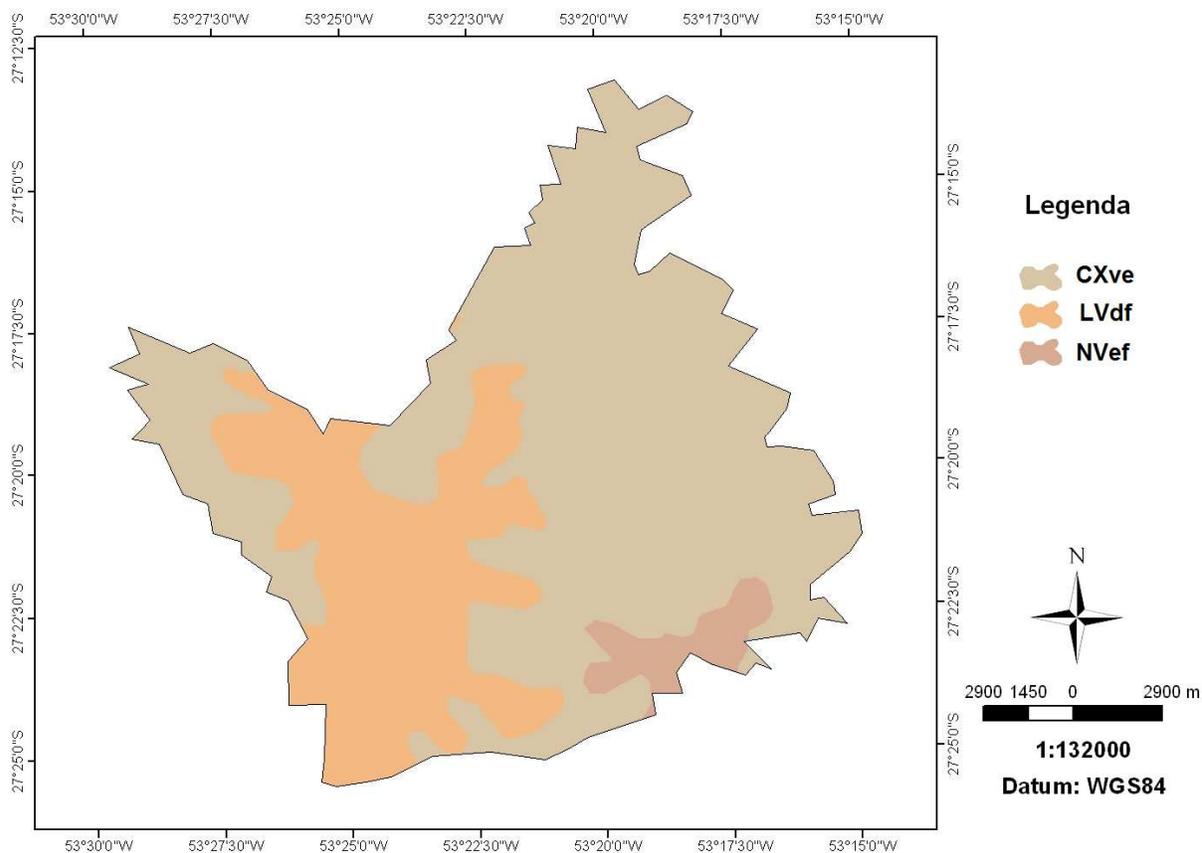


Figura 3 – Mapa pedológico do município de Frederico Westphalen, RS. Fonte: IBGE (1986).

A caracterização física e química dos perfis de solos presentes em Frederico Westphalen segundo Brasil (1973), IBGE (1986) e Streck et al. (2008), complementada com dados coletados em campo, consta do Anexo 1. Para confirmação das classes de solos predominantes em Frederico Westphalen, bem como para a caracterização das mesmas, foi feita a descrição morfológica de dois perfis, estando um deles sob área de CAMBISSOLO HÁPLICO e outro sob LATOSSOLO VERMELHO, ambos cultivados com sistemas de rotação de grãos. Além da descrição dos perfis de LATOSSOLO VERMELHO e CAMBISSOLO HÁPLICO em Frederico Westphalen, foi realizada também uma caracterização física e química até a profundidade de 30 cm, coletando-se amostras em mini-trincheiras abertas aleatoriamente nas lavouras. Os dados referentes a essa caracterização constam no Anexo 2.

Declividade

Para geração dos mapas de declividade dos municípios foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução de 30 m (INPE, 2011b) obtido a partir de imagens do Sensor ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*. A classificação da declividade, calculada em porcentagem, foi feita de acordo com os intervalos de classes preconizados em Embrapa (2009) e adotados por Ramalho Filho e Beek (1995), conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Níveis de declividade e classes de relevo

Nível de Declive	Classes de Relevo
0 a 3%	Plano
3 a 8%	Suave ondulado
8 a 20 %	Ondulado
20 a 45%	Forte ondulado
Acima de 45%	Montanhoso

Fonte: Embrapa (2009); Ramalho Filho e Beek (1995).

O município de Passo Fundo é caracterizado por um relevo predominantemente suave ondulado e ondulado, com elevações de longas pendentes, que formam entre si depressões fechadas denominadas coxilhas (BRASIL, 1973; IBGE, 1986). A Figura 4 apresenta a distribuição das classes de declividade com os respectivos percentuais de ocorrência em relação à área total do município.

Frederico Westphalen possui um relevo bastante diversificado, de patamares estruturais, com relevo variando de plano a fortemente ondulado (BRASIL 1973; IBGE, 1986). Conforme apresentado na Figura 5, em 70% da área do município predominam o relevo ondulado e forte ondulado e, em proporções menores, áreas com topografia mais planas.

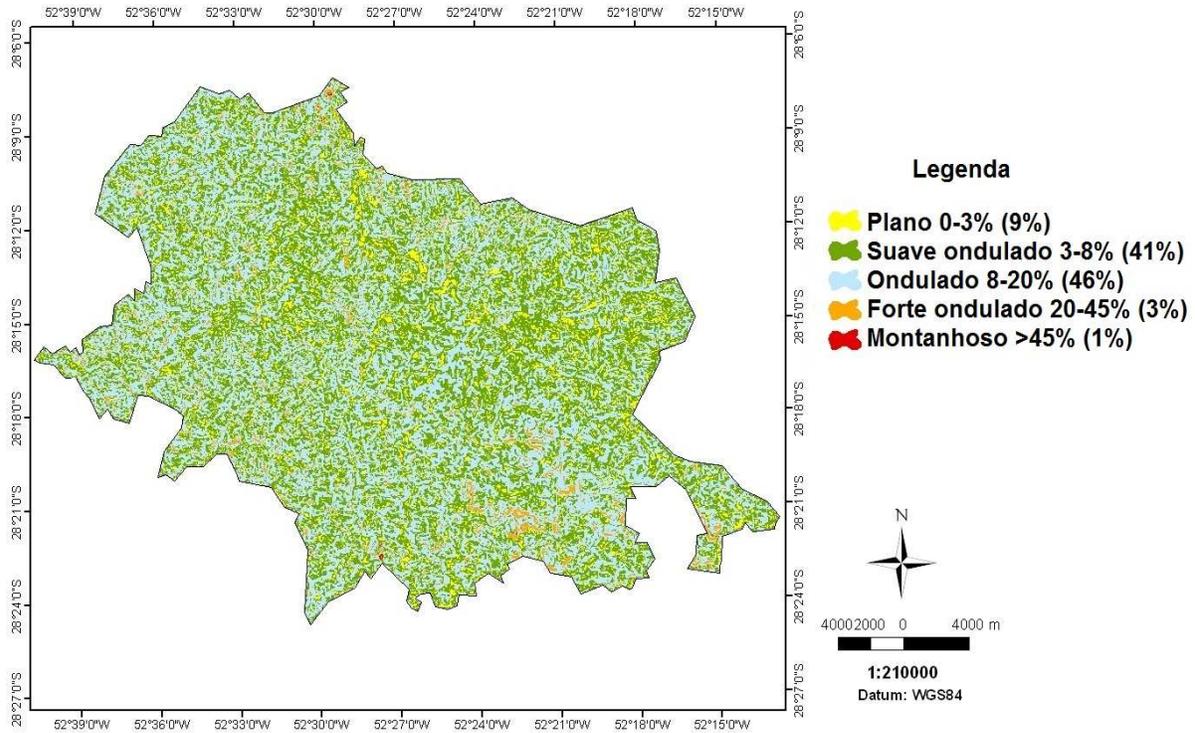


Figura 4 – Mapa das classes de declividade do Município de Passo Fundo, RS.

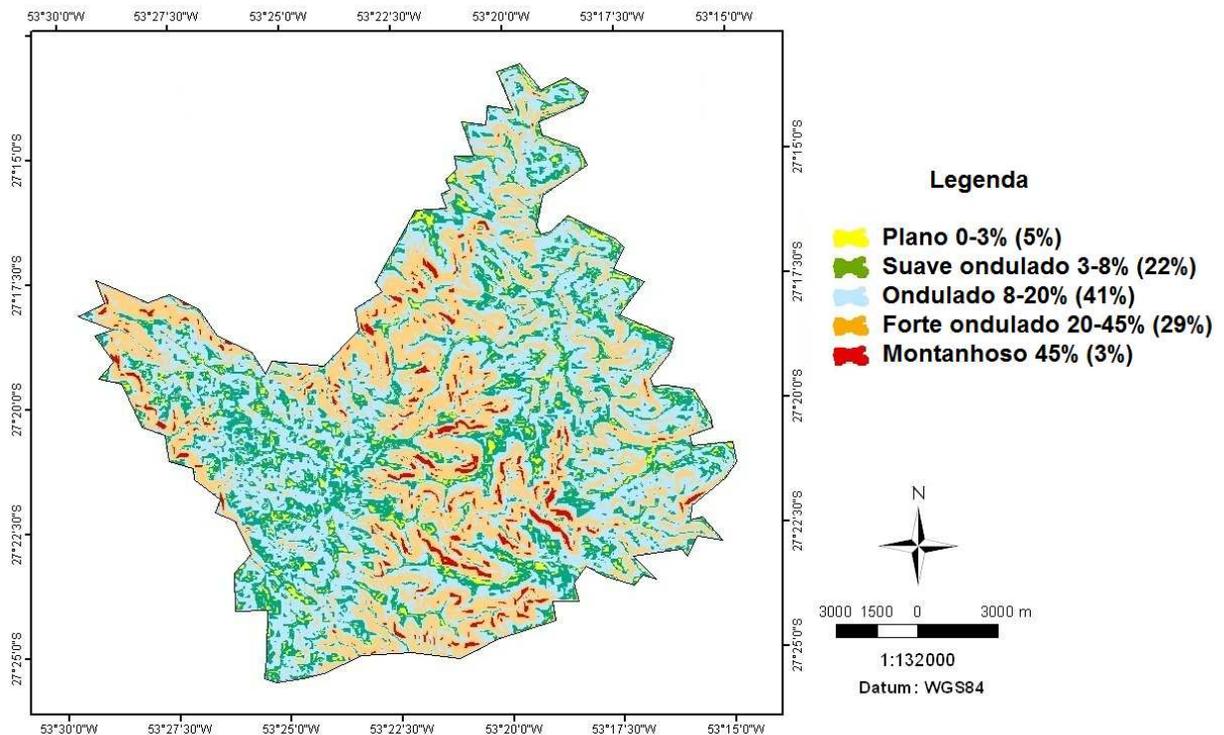


Figura 5 – Mapa das classes de declividade do município de Frederico Westphalen, RS.

Clima

Segundo a classificação de Köppen, o clima em Passo Fundo é descrito como subtropical-úmido (Cfa) com temperatura anual média de 17,5°C e precipitação pluvial anual de 1.787 mm. Os invernos são rigorosos podendo atingir temperaturas inferiores a 0°C, com geadas frequentes e neve ocasional (CLIMATE-CHARTS, 2008). A Figura 6 apresenta os valores médios mensais de precipitação e temperaturas máximas, mínimas e médias correspondentes à normal climatológica (série histórica de 1961 a 1990) e ao ano safra 2008/2009, ambos provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2010).

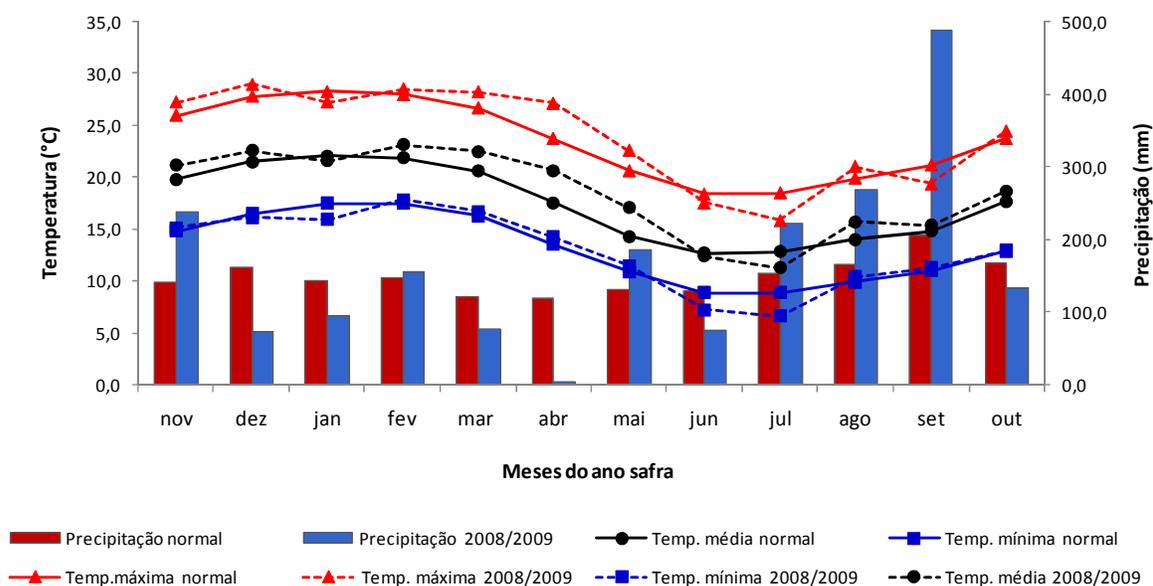


Figura 6 – Valores médios de precipitação (mm) e temperaturas (°C) máximas, mínimas e médias da normal climatológica (1961-1990) e para o ano safra 2008/2009 no município de Passo Fundo, RS. Fonte: INMET (2010).

O clima na região de Frederico Westphalen é caracterizado conforme a classificação de Köppen como subtropical úmido (Cfa), com temperatura média anual de 19,4°C, e precipitação anual de 1.819 mm. O município de Iraí, distante aproximadamente 30 km de Frederico Westphalen e com altitude de 235m, foi adotado como referência para utilização dos dados meteorológicos.

A Figura 7 apresenta os valores médios mensais de precipitação e temperaturas máximas, mínimas e médias correspondentes à normal climatológica (série histórica de 1961 a 1990) e ao ano safra 2008/2009, provenientes do INMET, para o município de Frederico Westphalen.

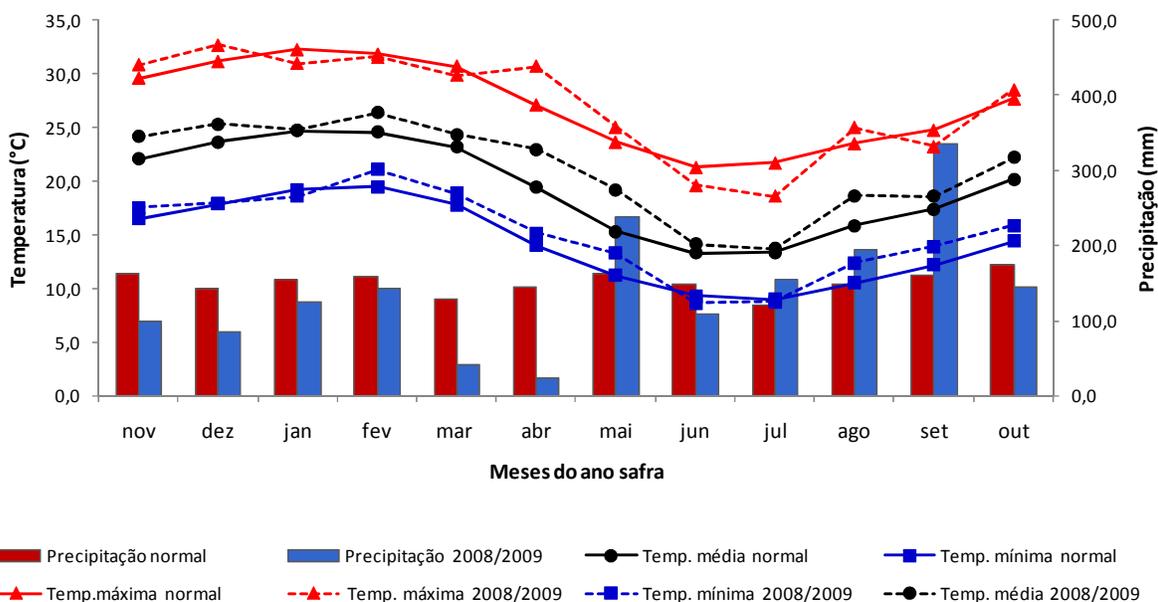


Figura 7 – Valores médios de precipitação (mm) e temperaturas (°C) máximas, mínimas e médias da normal climatológica (1961-1990) e para o ano safra 2008/2009 no município de Frederico Westphalen, RS. Fonte: INMET (2010).

Uso atual das terras

Para a classificação do uso atual das terras, foram utilizadas imagens datadas de abril de 2009 do sensor TM do satélite LANDSAT 5, órbitas 222/80 e 233/79, referentes a Passo Fundo e Frederico Westphalen, respectivamente, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2011a).

A partir do conhecimento acerca da resposta espectral de alvos terrestres e de princípios de fotointerpretação (textura, drenagem, relevo) procedeu-se à identificação das áreas com padrões semelhantes quanto aos aspectos de uso e cobertura do solo. O mapa do uso e cobertura do solo foi obtido utilizando-se o método de classificação supervisionada de Máxima Verossimilhança (CRÓSTA, 1993) e considerando um índice de exatidão global de aproximadamente 90% (FOODY, 2002).

2.2 Avaliação agroclimática para a cultura da soja

A avaliação agroclimática dos municípios para a cultura da soja foi realizada utilizando dados meteorológicos (precipitação e temperaturas máximas, mínimas e médias) de uma série de dados diários de 14 anos, correspondente ao período de 1995 a 2009, oriundos da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2010). Com base nesses dados foram calculados o balanço hídrico normal e o balanço hídrico sequencial, em nível decêndial, pelo método de Thornthwaite e Mather, com auxílio da planilha proposta por Rolim et al. (2005). O valor da capacidade de água disponível no solo (CAD) foi fixado em 75 mm para ambos os municípios, conforme recomendado pelo zoneamento agrícola para cultura cultivada em solos tipo 3, ou solos de textura argilosa (BRASIL, 2008).

Com os resultados dos balanços hídricos, foram obtidas as estimativas de evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF), excedente hídrico (EXC) e armazenamento de água no solo (ARM). A evapotranspiração máxima da cultura (ETm) foi obtida por meio da multiplicação da ETP pelo coeficiente de cultura (Kc) correspondentes a períodos decêndiais sugeridos por Matzenauer et al. (1998). O índice de satisfação das necessidades de água (ISNA), definido como sendo a razão entre a ETR e a ETm da soja, serviu de base para definição do risco climático para a cultura. Foram estabelecidas as seguintes classes de ISNA, de acordo com o recomendado pelo zoneamento de risco climático para a cultura da soja: baixo risco = $ISNA \geq 0,65$; médio risco = $0,55 \leq ISNA \leq 0,65$ e; alto risco = $ISNA \leq 0,55$ (BRASIL, 2008).

A disponibilidade hídrica do solo foi integrada aos subperíodos nos quais a cultura da soja é mais susceptível à falta de água, definidos pelo Ministério da Agricultura (BRASIL, 2008) como sendo: sub-período 1: de 10 dias após a emergência até o início do florescimento; sub-período 2: do início do florescimento à maturação. Foi considerado o plantio da cultivar de ciclo precoce, plantada no início de dezembro de 2008 e seguindo o ciclo de desenvolvimento conforme sugerido por Cunha e Hass (1996) (Tabela 2).

Tabela 2 – Ciclos característicos de cultivares de soja indicadas para o Rio Grande do Sul¹

Semeadura	Grupo de maturação					
	Precoce		Médio		Semitardio/Tardio	
	Eme-Flo ²	Eme-Mat ³	Eme-Flo ¹	Eme-Mat ²	Eme-Flo ¹	Eme-Mat ²
Outubro	64	156	63	162	72	170
Novembro	57	134	57	140	66	147
Dezembro	52	117	52	120	58	126

¹ A duração do sub-período de semeadura-emergência foi considerada fixa em 7 dias.

² Número médio de dias da emergência à floração.

³ Número médio de dias da emergência à maturação.

Fonte: Cunha e Hass (1996).

2.3 Avaliação da aptidão agrícola das terras

A avaliação da aptidão agrícola foi realizada utilizando a metodologia proposta por Ramalho Filho e Beek (1995), com adaptações metodológicas sugeridas por Pereira (2002). A “metodologia avaliação da aptidão agrícola das terras” foi elaborada com base na metodologia proposta pela FAO (FAO, 1973).

Originalmente, a metodologia pressupõe a avaliação considerando quatro tipos de usos agrícolas (lavouras, pastagem plantada, silvicultura e/ou pastagem natural, preservação da flora e da fauna) e três níveis de manejo: A (nível tecnológico baixo), B (nível tecnológico médio) e C (nível tecnológico alto). No caso do uso com lavouras, a metodologia prevê a avaliação da aptidão para os níveis de manejo A, B e C. Já, para pastagem plantada e silvicultura, somente o nível B é considerado, e somente o nível A para a pastagem natural.

Para avaliar a aptidão agrícola das terras dos municípios de Passo Fundo e de Frederico Westphalen foram definidas inicialmente as Unidades de Terra (UT), que representam áreas homogêneas em relação aos principais fatores condicionantes do uso agrícola, isto é, clima, solos e topografia, uma vez que o nível de manejo é considerado à parte. Considerando um mesmo tipo de clima para o município como um todo, as unidades de terra foram definidas por combinações entre um tipo de solo com uma classe de declividade. Partindo desse conceito, o mapa das unidades de terra de cada município foi obtido pelo cruzamento entre o mapa de solos com o mapa das classes de declividade, em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) ArcGis 9.3 (ESRI, 2010). A seguir, cada UT foi caracterizada em função dos seguintes fatores condicionantes da aptidão agrícola: disponibilidade de nutrientes, disponibilidade de água, excesso de água, suscetibilidade à erosão e impedimentos à mecanização.

Na caracterização dos fatores condicionantes das UT foram utilizados os dados referidos anteriormente, selecionados a partir da literatura (BRASIL, 1973; IBGE, 1986; MALUF, 2000; STRECK et al., 2008, EMBRAPA, 2009) e dados coletados e observados nos locais dos experimentos. Os atributos diagnósticos empregados na caracterização de cada fator condicionante, tais como pH do solo, saturação por bases, profundidade efetiva, textura, drenagem, pedregosidade, dentre outros, encontram-se relacionados no Anexo 1.

Após caracterizadas as UT de cada município, os atributos diagnósticos de cada fator condicionante foram confrontados com os requerimentos edáficos do tipo de utilização mais intensivo, no caso a cultura da soja, atribuindo-se graus de limitação de acordo com o menor ou maior afastamento em relação à condição ideal. A metodologia prevê a distinção de cinco graus de limitação: nulo, ligeiro, moderado, forte e muito forte. Para auxiliar a atribuição dos graus de limitação a cada fator condicionante da aptidão agrícola, foram empregados critérios levantados na literatura e apresentados no Anexo 3.

Resumidamente, o fator condicionante *Deficiência de Fertilidade* foi avaliado com base nos seguintes atributos diagnósticos: capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), soma de bases (S), toxicidade por alumínio trocável (Al^{3+}), adotando-se os parâmetros da Comissão de Fertilidade do Solo do RS e SC (COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO RS E SC, 1995) conforme Anexo 3.

Na avaliação do fator *Deficiência de Água*, tomou-se como base a deficiência hídrica durante o período de cultivo da soja e a textura do solo. Este fator foi complementado com a análise do balanço hídrico sequencial para esta cultura nos dois municípios. Já para a avaliação do *Excesso de Água*, o atributo diagnóstico considerado foi a classe de drenagem do solo.

Para o fator condicionante *Suscetibilidade à Erosão* considerou-se o tipo de solo, a profundidade e a declividade do terreno. Para avaliação do fator *Impedimentos à Mecanização* os atributos declividade do terreno, profundidade do solo e presença ou não de pedregosidade/rochosidade foram avaliados. Os fatores condicionantes bem como os atributos diagnósticos adotados para definição dos graus de limitação constam do Anexo 3. Finalmente, as classes de aptidão agrícola foram definidas comparando-se os graus de limitação atribuídos aos fatores condicionantes com os graus máximos estipulados no quadro-guia para avaliação da aptidão agrícola para clima subtropical proposto na metodologia, classificando-se a aptidão

de cada combinação de UT e tipo de utilização em boa, regular, restrita ou inapta. Áreas identificadas como vegetação natural, com declividade superior a 45 graus, áreas destinadas à conservação e área urbana foram excluídas da avaliação da aptidão agrícola. A estrutura do processo de avaliação da aptidão das terras segundo a metodologia de avaliação de aptidão agrícola das terras está representada na Figura 8. Com os resultados dessa avaliação foi gerado o mapa de aptidão agrícola das terras dos dois municípios empregando o programa ArcGis 9.3.

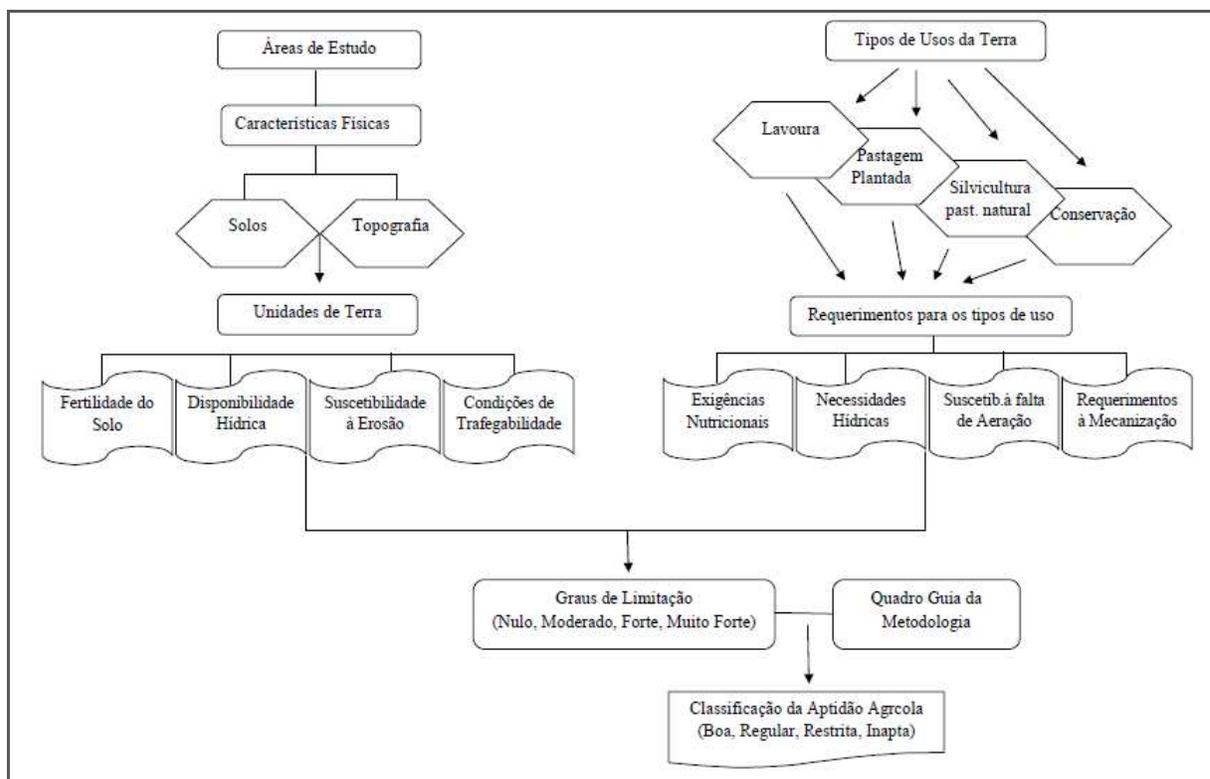


Figura 8 – Estrutura da Metodologia de avaliação da aptidão agrícola das terras.
Fonte: Adaptado de Ramalho Filho e Beek (1995).

2.4 Avaliação da adequação do uso atual das terras

Para avaliação da adequação do uso das terras com soja nos municípios de Passo Fundo e de Frederico Westphalen procedeu-se ao cruzamento do mapa de uso atual das terras com o mapa de aptidão agrícola das terras em ambiente Arc Gis 9.3 (ESRI, 2010). Antes do cruzamento dos dois mapas, foi realizado o agrupamento das classes do mapa de uso atual considerando quatro categorias: lavouras, pastagem, silvicultura e áreas com vegetação natural preservada. As classes mapeadas como área urbana, corpos d'água, áreas de vegetação natural,

áreas com declividade superior a 45 graus, bem como áreas sombreadas e áreas não mapeadas não foram submetidas à avaliação da adequação do uso.

Ao cruzarem as informações sobre o uso atual das terras em cada município com o mapa de classificação da aptidão agrícola extrairam-se então, os montantes de áreas ocupadas de forma adequada ou inadequada em cada município, representando assim quais as terras estão sendo exploradas dentro dos limites impostos pela classificação da aptidão agrícola.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Uso atual das terras

A classificação do uso atual das terras em Passo Fundo resultou em seis categorias, representadas por área urbana, corpos d'água, vegetação natural, solo exposto, pastagem e lavoura, conforme Figura 9.

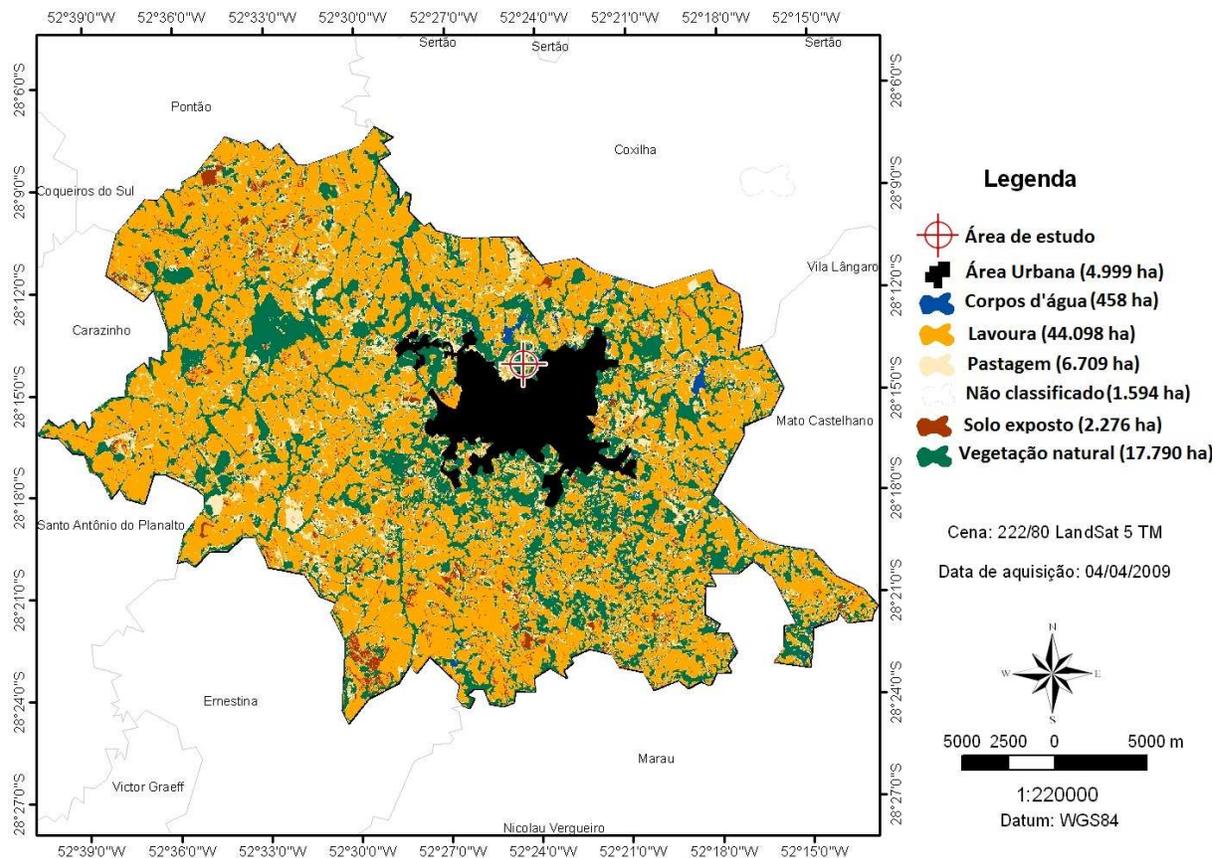


Figura 9 – Mapa de usos da terra no município de Passo Fundo (RS) em 2009.

A maior ocupação espacial em Passo Fundo se dá com lavouras, particularmente com culturas anuais, dentre elas soja e milho na safra de verão e trigo, aveia e forrageiras na safra de inverno. Esta categoria de uso ocupa 56% da área total mapeada e está distribuída por toda área geográfica do município.

Dados do Censo Agropecuário (IBGE, 2006) mostram que, em Passo Fundo, há um total de 758 estabelecimentos agropecuários, considerando terras próprias e na condição de produtor, ou seja, excluindo aquelas arrendadas, ocupadas e as terras sem titulação. Deste

total, 32% são propriedades com áreas de até 10 ha, 20% entre 10 a 20 ha, 22% entre 20 a 50 ha e 26% propriedades com mais de 50 ha. Ainda, dos 758 estabelecimentos agropecuários, 60% são propriedades destinadas à produção de lavouras temporárias.

A área urbana representa 6,5% da área total do município. Com relação à vegetação natural, esta ocupa uma área equivalente a 23% e está distribuída principalmente no entorno e a sudoeste da área urbana. Nesta categoria, destaca-se a Floresta Nacional de Passo Fundo com 1.328 ha. Em proporções menores, cerca de 8,5%, observa-se o uso das terras com pastagens.

A classificação do uso atual das terras em Frederico Westphalen resultou em sete categorias conforme discriminadas na Figura 10. A área urbana ocupa cerca de 2,3% da área total do município. Diferente do caracterizado para o município de Passo Fundo, a maior ocupação aqui se dá com pastagem, classe de uso que ocorre em cerca 48% da área mapeada. O uso com culturas anuais, principalmente de soja, trigo e milho, e culturas temporárias, tangerina, erva-mate e cana-de-açúcar (SEMA; UFSM, 2001), ocorre em 27% da área e, as áreas de vegetação natural ocupam cerca de 15%. A categoria classificada como área sombreada (1,7%) corresponde àquelas onde não foi possível identificar o uso da terra, devido, principalmente, a interferências de nuvens nas imagens utilizadas.

Frederico Westphalen possui uma população rural que corresponde a 25% da população total do município (IBGE, 2006). Segundo o Censo Agropecuário de 2006, mais da metade dos 1.267 estabelecimentos agropecuários em Frederico Westphalen, ou seja, 57% possuem menos de 20 ha de terra. Dentre as demais propriedades, 23% possuem área entre 20 e 50 ha e apenas 20% são maiores que 50 ha.

Todos os tipos de usos agrícolas identificados no mapa de uso das terras em Frederico Westphalen encontram-se distribuídos por toda área do município, entretanto observa-se uma concentração maior do uso com cultura anual na região nordeste e leste da área urbana, onde há predominância de CAMBISSOLO HÁPLICO, conforme demonstrado no mapa de solos (Figura 3). Um dos possíveis motivos pelo qual isso ocorre é a “melhor” fertilidade apresentada por este tipo de solo, comparativamente aos demais, embora sejam áreas altamente susceptíveis à erosão e com indícios de degradação. Porém, não se pode atribuir essa ocupação exclusivamente ao critério “melhor fertilidade do solo”. Outros fatores, como

nível do manejo adotado e características culturais locais, também podem estar influenciando essa ocupação.

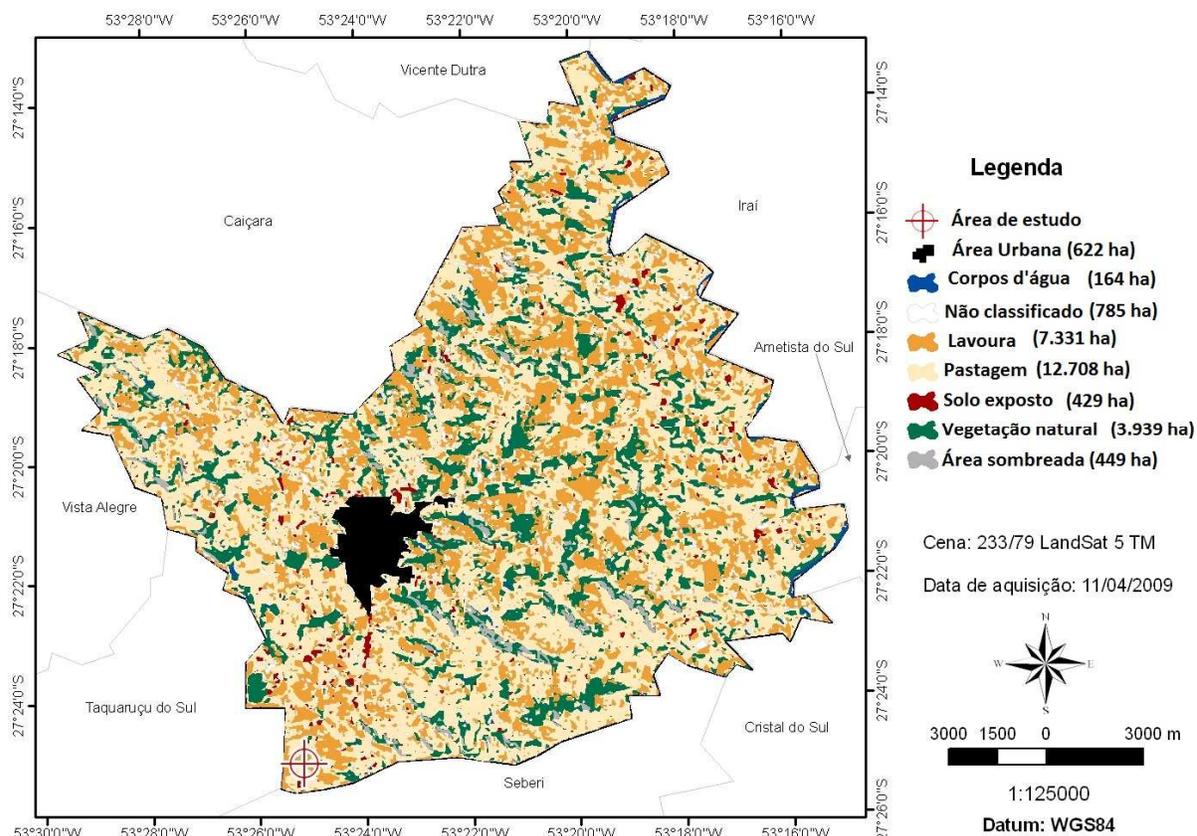


Figura 10 – Mapa de usos da terra no município de Frederico Westphalen (RS) em 2009.

3.2 Caracterização agroclimática para a cultura da soja

3.2.1 Precipitação pluvial e produtividade de soja

As Figuras 11 e 12 apresentam a precipitação ocorrida entre os meses de dezembro e março – período de maior possibilidade de ocorrência de déficit hídrico para a soja – e a produtividade desta cultura, respectivamente, nos municípios de Passo Fundo e Frederico no período de 1995 a 2009. É comprovado por vários autores, dentre eles Berlatto e Fontana (2003), Cunha et al. (2001), Matzenauer et al. (2002), e Mello et al. (2007), Mota et al. (1996), que as quebras de produtividade da soja no RS se relacionam com a ocorrência de deficiência hídrica em determinadas fases do ciclo da cultura, particularmente, durante o período de floração e de enchimento de grãos. Portanto, ainda que a área plantada se mantenha constante,

observa-se em vários anos uma relação direta entre a quebra do rendimento da cultura e a redução da precipitação anual (Figuras 11 e 12).

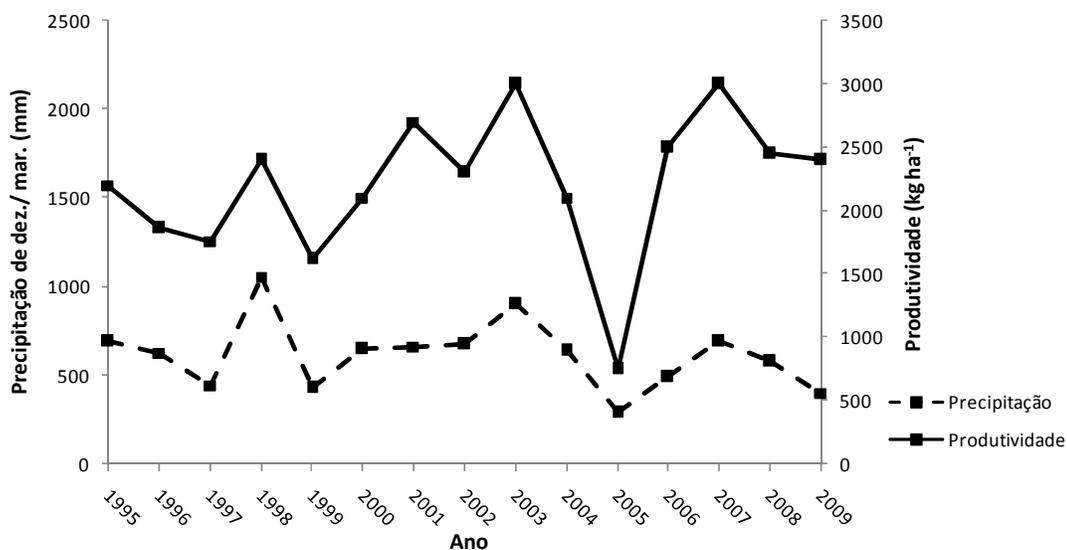


Figura 11 – Precipitação anual (mm) e produtividade (kg ha⁻¹) de soja em Passo Fundo, RS. Fonte: IBGE (2011).

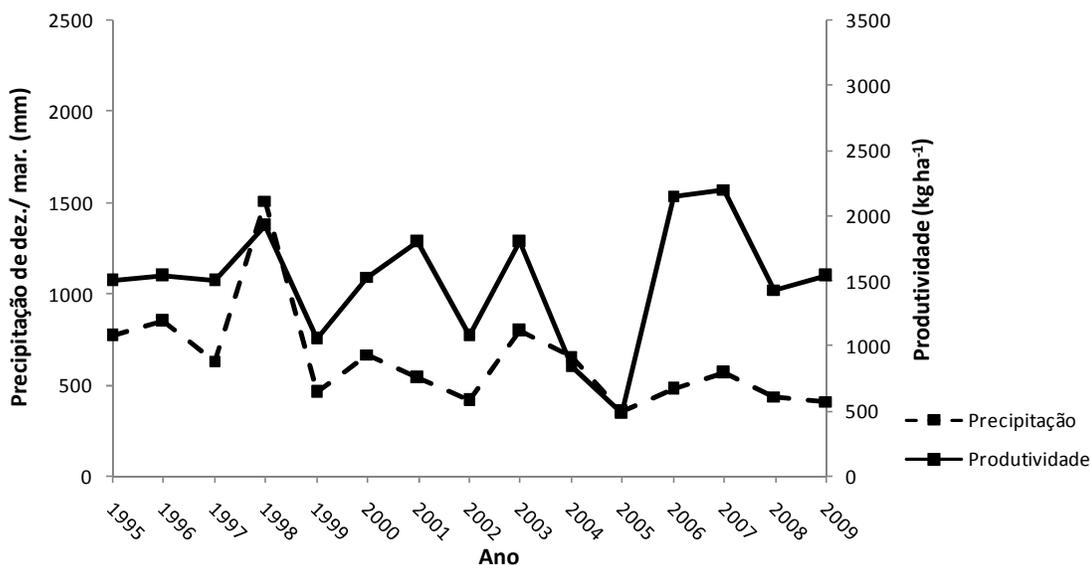


Figura 12 – Precipitação anual (mm) e produtividade (kg ha⁻¹) de soja em Frederico Westphalen, RS. Fonte: IBGE (2011).

A influência da disponibilidade hídrica na produtividade de soja fica evidente com as quebras de produtividade ocorridas nas safras de 1995/1996, 2001/2002 e 2004/2005 (Figuras 11 e 12). O rendimento na safra de 1995/1996, por exemplo, foi de 1.860 kg ha⁻¹ em Passo Fundo e de 1.538 kg ha⁻¹ em Frederico Westphalen. O ano de 2004/2005 pode ser considerado aquele de maiores quebras de produtividade, atingindo valores de 750 kg ha⁻¹ e 480 kg ha⁻¹ em Passo Fundo e Frederico Westphalen, respectivamente. Com relação à safra de 2008/2009, o rendimento médio em Passo Fundo foi de 2.400 kg ha⁻¹ e em Frederico Westphalen de 1.540 kg ha⁻¹, valores que estiveram acima das médias dos últimos 14 anos, que foram de, respectivamente, 2.200 kg ha⁻¹ e 1.500 kg ha⁻¹ (IBGE, 2011). Para Matzenauer et al. (2003), os baixos rendimentos da soja no estado estão relacionados aos anos em que ocorreram deficiências hídricas durante os meses de desenvolvimento da cultura.

Matzenauer et al. (2002) afirmam que a produção de soja no RS tem sido crescente em consequência da aplicação de tecnologia, do uso materiais genéticos de maior potencial produtivo e da capacitação dos produtores rurais. No entanto, na maior parte dos anos, a frequência e a intensidade das chuvas no período do desenvolvimento da cultura, que ocorre entre novembro e março, têm sido insuficientes para que esta manifeste seu potencial produtivo. Berlato e Fontana (2003) ressaltam que o clima é o principal fator responsável pelas oscilações de produtividade e frustrações da cultura da soja no estado, e estimam que 93% das perdas na safra de soja no RS ocorram em razão das estiagens. Esse risco elevado faz com que as taxas de sinistralidade na agricultura sejam muito altas. Segundo Cunha e Assad (2001), nas culturas de verão, essa taxa é em média de 16,27%.

3.2.2 Balanço hídrico

O cálculo do balanço hídrico normal mensal em Passo Fundo, considerando a série de dados correspondentes aos anos de 1995 a 2009 e CAD de 75 mm, demonstrou não haver deficiência hídrica no solo no decorrer desse período (Figura 13). A precipitação anual média durante esse período foi de 1.985 mm ano⁻¹.

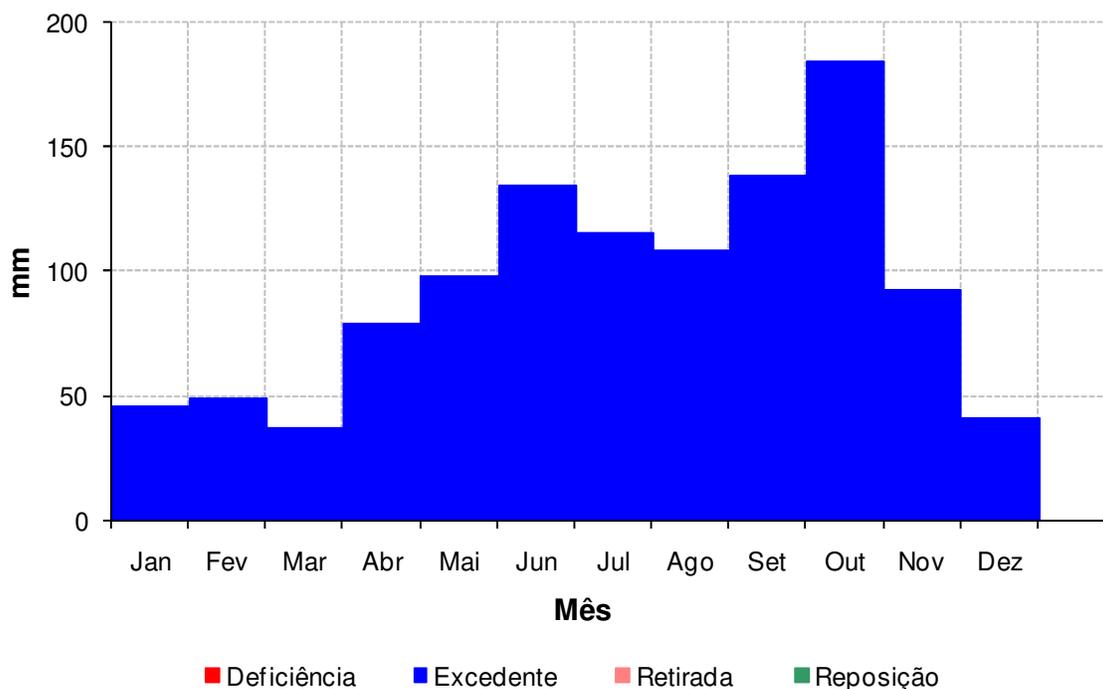


Figura 13 – Deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica segundo o balanço hídrico normal do solo, em Passo Fundo (RS), utilizando dados de 1995 a 2009.

No município de Frederico Westphalen, o balanço hídrico normal mostra que no mês de março a ETP superou a ETR, ocasionando deficiência hídrica de 3 mm (Figura 14). A precipitação anual média do período compreendido entre 1995-2009 foi de 1.980 ano⁻¹.

O estado do RS é caracterizado climaticamente por apresentar estações do ano bem definidas, com precipitação pluvial relativamente bem distribuída durante o ano. Entretanto, a precipitação apresenta uma alta variabilidade interanual, o que compromete o rendimento dos cultivos. Berlato e Fontana (1999) apontam como uma das principais causas da variabilidade da precipitação pluvial na região sul do Brasil os fenômenos El Niño e La Niña, caracterizados por anomalias no padrão de temperatura da superfície do Oceano Pacífico. No ano de 2008, por exemplo, ocorreu o fenômeno La Niña, caracterizado pela redução da precipitação pluvial no final daquele ano até outono do ano seguinte. Já no segundo semestre de 2009, o fenômeno El Niño ocasionou precipitações acima da média, causando também, prejuízos à safra de inverno.

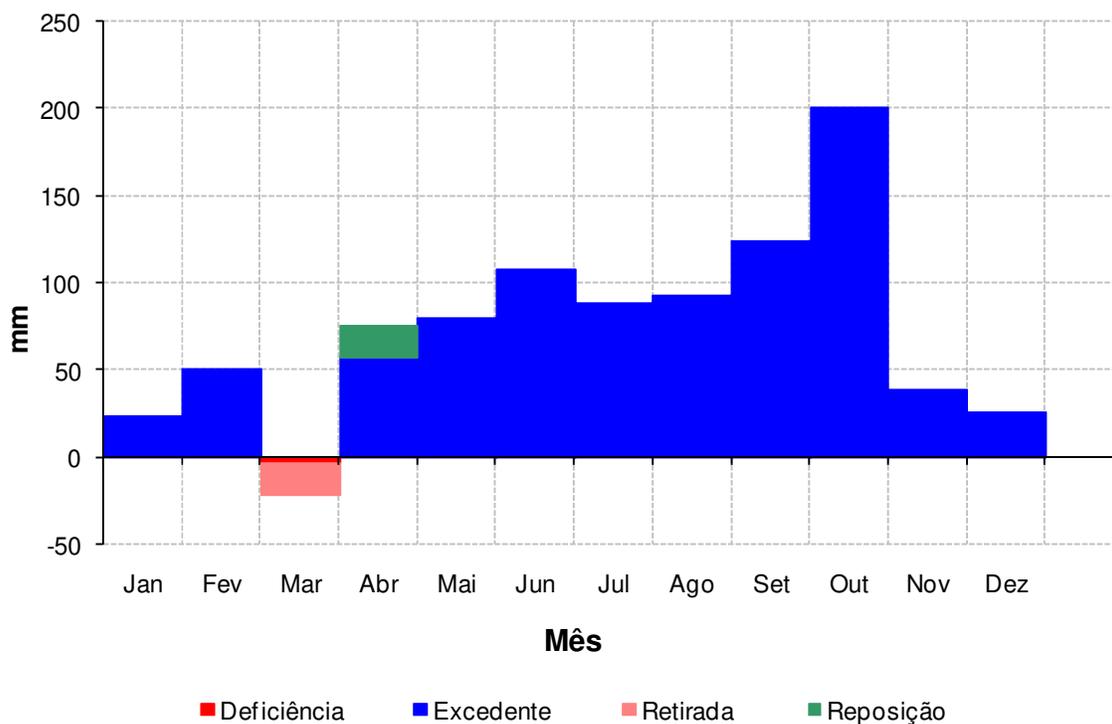


Figura 14 – Deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica segundo o balanço hídrico normal do solo, em Frederico Westphalen (RS), com dados de 1995 a 2009.

Quando analisado o balanço hídrico sequencial decendial correspondente ao ano safra 2008/2009 observa-se ocorrência de deficiência hídrica nos dois municípios estudados, durante alguns períodos que coincidem com as fases críticas da cultura da soja, associada à falta de água. As Figuras 15 e 16 demonstram que, em Passo Fundo, em dezembro de 2008, bem como no final de janeiro e início de fevereiro de 2009 a ETP superou a ETR ocasionando pequenos intervalos de déficit hídrico no solo.

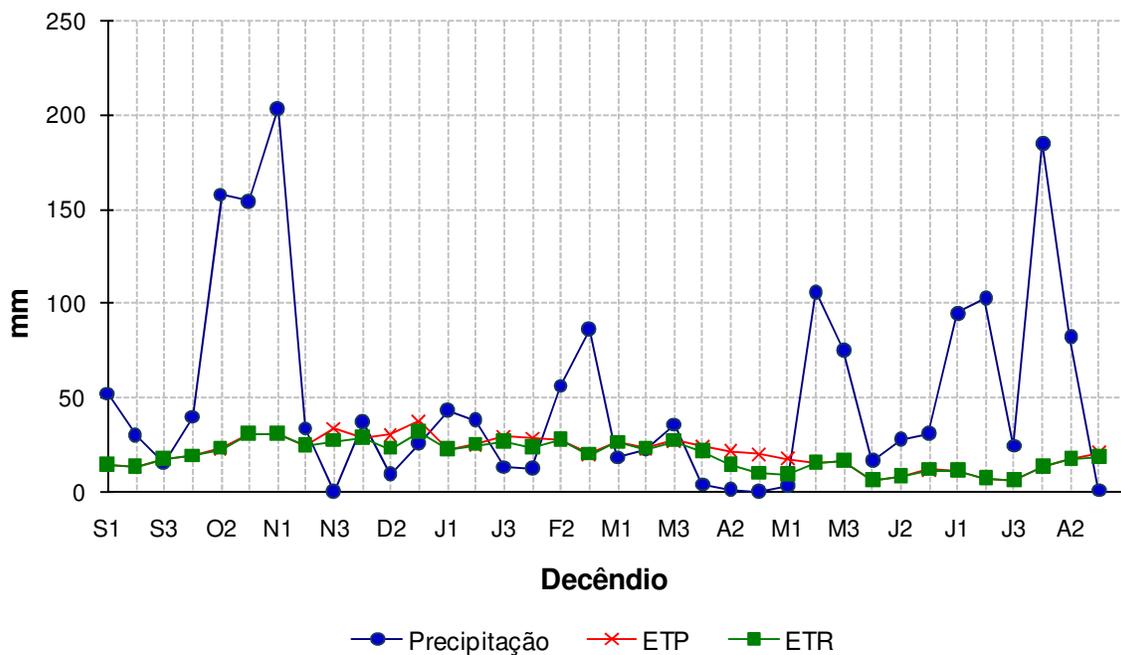


Figura 15 – Precipitação, evapotranspiração potencial (ETP) e evapotranspiração real (ETR) segundo o balanço hídrico sequencial decêndial do solo, em Passo Fundo (RS), durante os meses do ano safra 2008/2009.

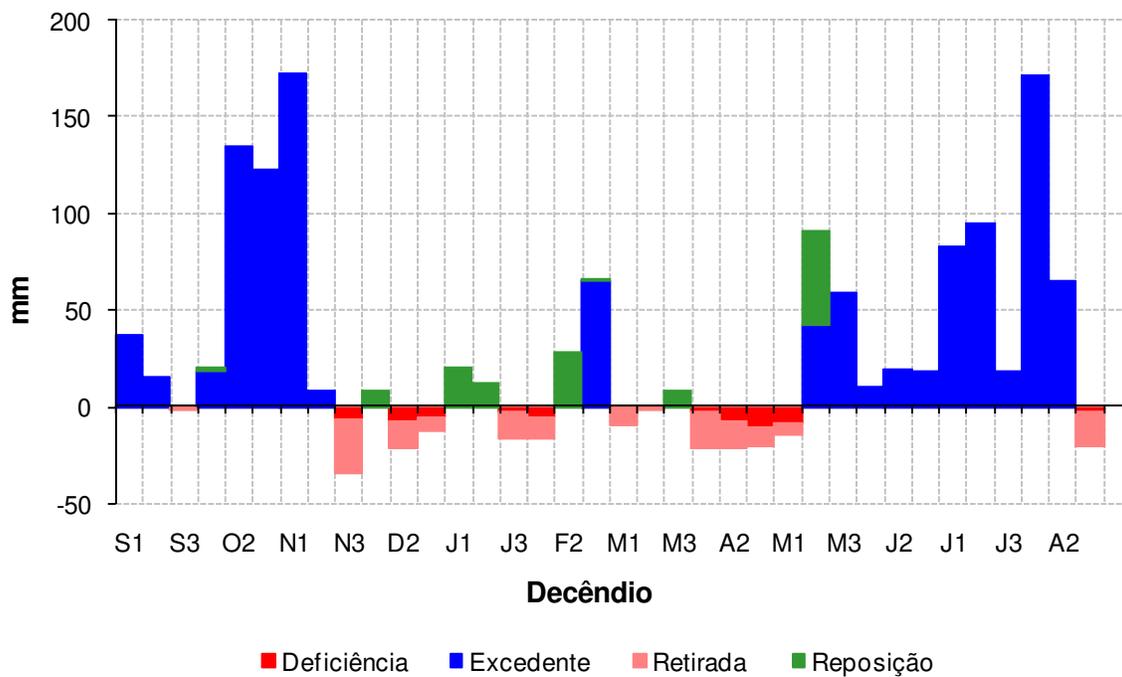


Figura 16 – Deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica segundo o balanço hídrico sequencial decêndial do solo, em Passo Fundo (RS), durante os meses do ano safra 2008/2009.

Da mesma forma, no município de Frederico Westphalen, também podem ser observados intervalos de déficits hídricos ainda mais expressivos do que os observados em Passo Fundo (Figuras 17 e 18). Em termos médios, os meses de janeiro, fevereiro e março concentram a floração e o enchimento de grãos de soja, sabidamente, os dois períodos mais críticos da cultura em relação à água. Esses são, também, os meses em que são verificadas as menores probabilidades da precipitação pluvial superar a evapotranspiração de referência, ou seja, as maiores probabilidades de ocorrência de déficit hídrico (ÁVILA et al., 1996). Portanto, a deficiência hídrica ocorrida durante este período pode ter influenciado a produtividade da safra de verão naquele município.

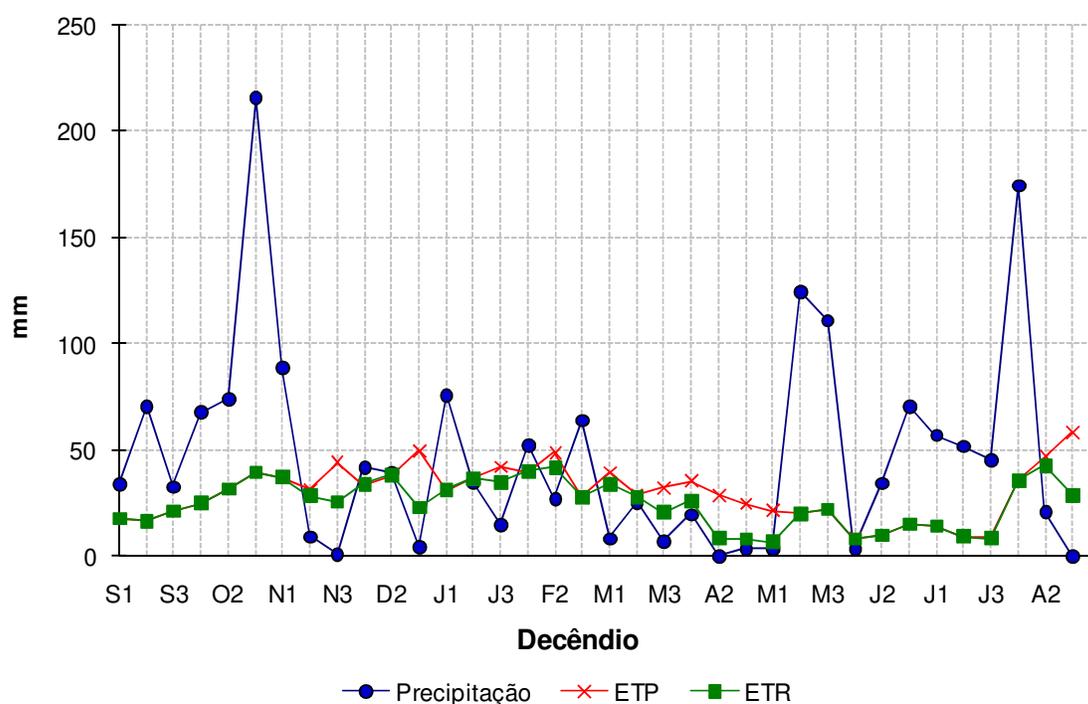


Figura 17 – Precipitação, evapotranspiração potencial (ETP) e evapotranspiração real (ETR) segundo o balanço hídrico sequencial decêndial do solo, em Frederico Westphalen (RS), durante os meses do ano safra 2008/2009.

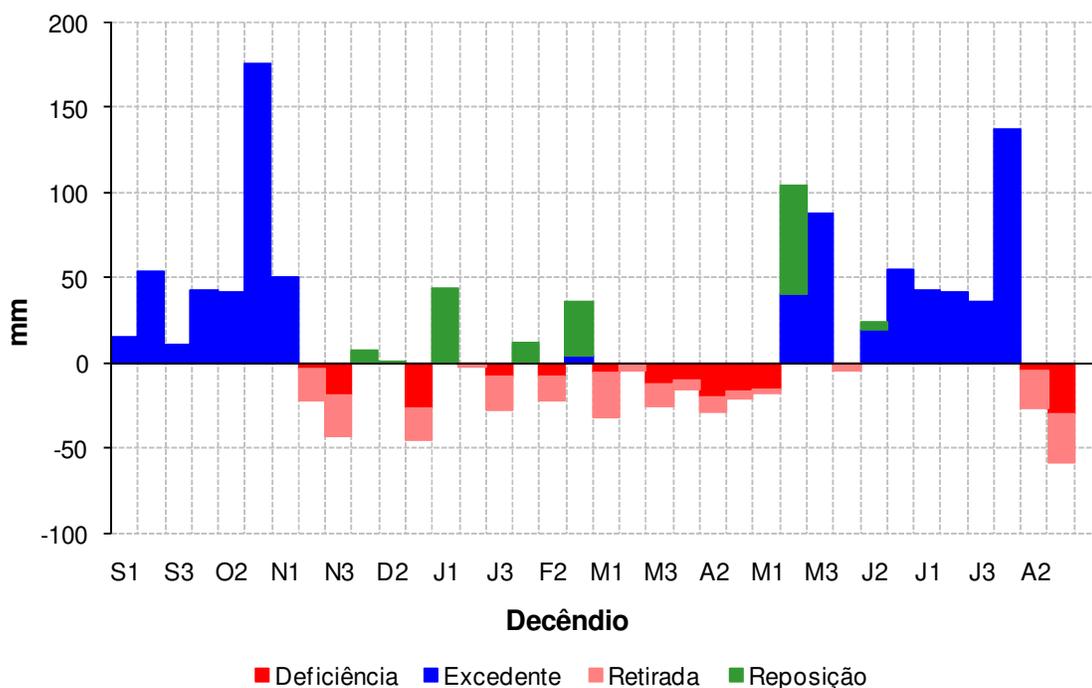


Figura 18 – Deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica segundo o balanço hídrico sequencial decêndial do solo, em Frederico Westphalen (RS), durante os meses do ano safra 2008/2009.

Relacionando os períodos de déficits hídricos no solo, os índices de satisfação de necessidades hídricas da soja (ISNA) (Tabela 3), e o ciclo fisiológico de cultivares de soja, plantadas no início de dezembro no RS (Tabela 2), verifica-se que a ocorrência de deficiência hídrica no solo coincidiu com sub-períodos críticos de desenvolvimento da cultura à falta de água (entre a emergência e o florescimento e na fase de enchimento de grãos). Em Passo Fundo, a deficiência hídrica durante o ciclo da soja foi de 42 mm (Tabela 3). Esse déficit apresenta-se distribuído durante todo o ciclo, com maiores intensidades na segunda quinzena de dezembro e no mês de abril. No primeiro decêndio de fevereiro, verifica-se um valor de ISNA de 0,56, o que caracteriza um período de risco climático médio. Estudos realizados por Matzenauer et al. (1998) relatam valores de déficit hídricos variando entre 26 mm a 371 mm, correspondentes ao período de 1976 a 1997, para o ciclo completo da soja plantada em Passo Fundo em 01 de dezembro. Ao comparar os valores dos déficits em diferentes datas de plantio (01/10, 01/11 e 01/12), esses mesmos autores concluíram que a deficiência hídrica total no ciclo da soja diminui à medida que se retarda a época de plantio.

Analisando o balanço hídrico do solo juntamente com os dados de produtividade da cultura obtidos na safra 2008/2009 (2.540 kg ha⁻¹), comparativamente à média dos rendimentos do período entre 1995 e 2009 (2.400 kg ha⁻¹), conclui-se que a produção de soja plantada em dezembro de 2008 em Passo Fundo não foi significativamente afetada pela deficiência hídrica.

Tabela 3 – Déficit hídrico (DH) e Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), em período decendial, em Passo Fundo e Frederico Westphalen (RS) no ano safra 2008/2009 para a cultura da soja

Mês	Dezembro			Janeiro			Fevereiro			Março			Abril		
Decêndio	D1	D2	D3	J1	J2	J3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	A1	A2	A3
Passo Fundo															
DH (mm)	0,00	7,40	5,78	0,00	0,00	2,79	5,32	0,00	0,00	0,50	0,11	0,00	2,85	7,21	9,97
ISNA	1,00	0,76	0,85	0,83	0,77	0,65	0,56	0,69	0,69	0,70	0,74	0,83	0,98	0,67	0,50
Frederico Westphalen															
DH (mm)	0,00	0,00	26,30	0,00	0,18	7,24	0,00	7,09	0,00	5,68	1,36	11,67	9,27	20,0	16,59
ISNA	1,00	0,83	0,46	0,83	0,77	0,59	0,69	0,59	0,69	0,61	0,71	0,53	0,82	0,30	0,33

Em Frederico Westphalen, a deficiência hídrica durante o período de cultivo da soja foi superior à de Passo Fundo, totalizando 105,4 mm. Durante todo o ciclo da cultura, foram observados intervalos de déficits hídricos, particularmente, nos meses de fevereiro e março, os quais coincidem com os períodos críticos da cultura à falta de água. Foram observados valores de ISNA entre 0,55 e 0,65 e inferiores a 0,55 (Tabela 3) caracterizando esses períodos como de médio e alto risco climático, respectivamente.

Considerando a cultivar de ciclo precoce plantada no início do mês de dezembro, e a capacidade de armazenamento de água no solo de 75 mm, Cunha et al. (2001) encontraram valores de ISNA superiores a 0,65 para o plantio de soja em Frederico Westphalen, caracterizando o município como de baixo risco climático sob o ponto de vista climático. Entretanto, esses mesmos autores ressaltam que outras variáveis relacionadas às condições climáticas, do solo e do manejo devem ser consideradas. Embora Frederico Westphalen esteja inserido em uma região do estado considerada favorável ao plantio da soja sob o ponto de vista climático (CUNHA et al., 1998; CUNHA et al., 2004) pode se dizer que períodos de estiagens ocorridos durante a fase de cultivo da soja podem ter influenciado a produtividade da safra de 2008/2009 e que as condições dos solos (pouco profundos e pedregosos) intensificaram o efeito desse déficit sobre a produção.

Costamilan e Ferreira (2009) atribuem as perdas de produtividade na safra 2008/2009 no RS à estiagem que ocorreu no final do ciclo da cultura naquele ano e também à ocorrência de ferrugem da soja. Segundo dados de algumas cooperativas consultadas pelo mesmo autor, a perda relacionada à ferrugem foi, em média, inferior a uma saca de 60 kg ha^{-1} , enquanto que a perda relacionada à estiagem representou uma redução média de 605 kg ha^{-1} , o equivalente a 21,5% da produção. A entidade que relatou maiores perdas foi a Cooperativa Triticola Vacariense (Cooperval), que constatou 33% de redução entre o rendimento esperado e o colhido, e a que apresentou perdas menores foi a Cotrijal, da região de Não-Me-Toque com 4% de redução no rendimento.

A análise agroclimática realizada por meio do ISNA e dos dados do balanço hídrico sequencial para a cultura da soja, associada aos dados de produtividade, levam a concluir que Passo Fundo apresenta restrições de ordem climática à produtividade de soja, que variam de ligeira a moderada, comprometendo assim a aptidão agrícola dessas terras. Já em Frederico Westphalen, essa restrição manifesta-se de forma mais intensa, podendo ser interpretada como moderada a forte. Porém, em conjunto com os fatores climáticos, devem ser avaliados também os fatores pedológicos. A qualidade do solo, assim como o sistema ou práticas de manejo adotadas são fatores condicionantes da produção agrícola.

3.3 Avaliação da aptidão agrícola das terras

3.3.1 Caracterização das Unidades de Terra e suas qualidades

O cruzamento do mapa de solos e de classes de declividade do município de Passo Fundo resultou na diferenciação de 19 Unidades de Terra (UT) (Figura 19).

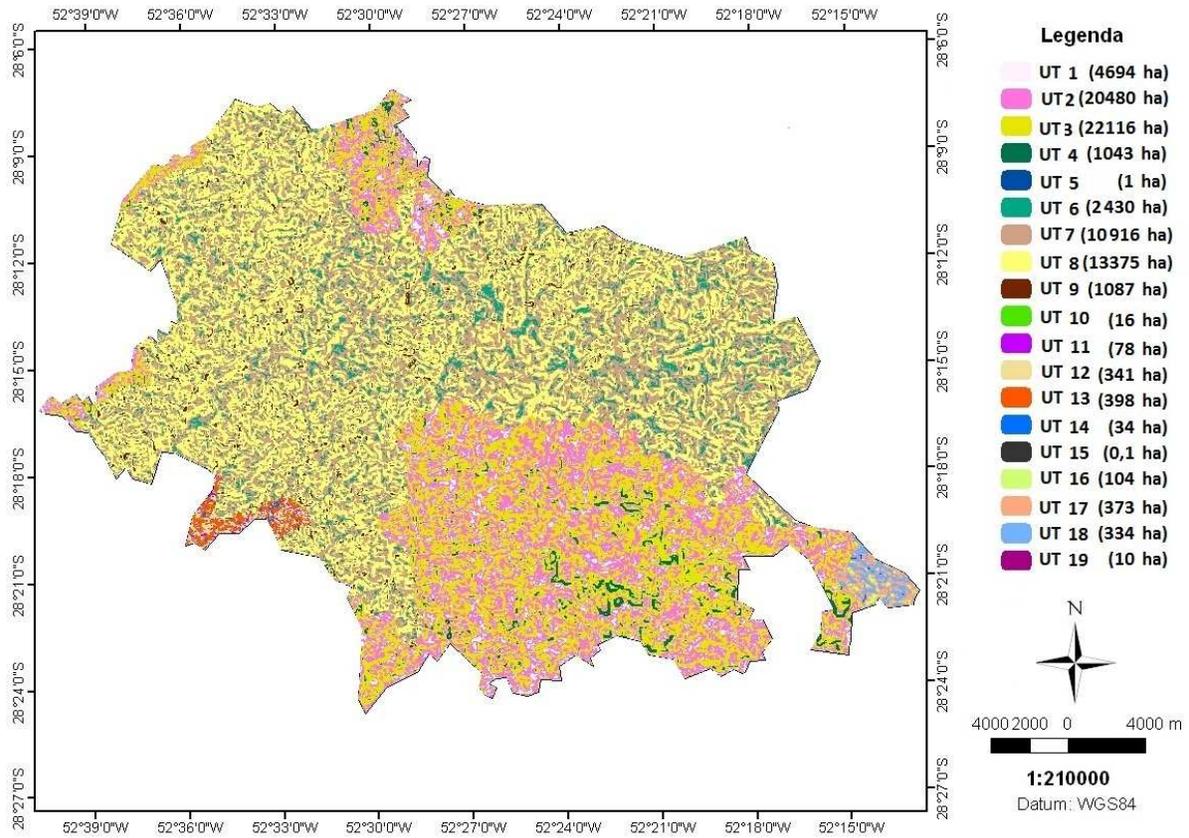


Figura 19 – Unidades de Terra caracterizadas no município de Passo Fundo, RS.

A Tabela 4 apresenta as áreas em percentual, bem como a classe de solo e de declividade que compõe cada Unidades de Terra. Verificou-se que Unidades de Terra com declividade superiores a 20% representaram menos de 4% da área total do município.

Tabela 4 – Unidades de Terra com seus respectivos percentuais de área, classes de solo e de declividade em Passo Fundo, RS

Unidade de Terra (solo x declividade)	Área (%)	Classe de Solo	Classe de Declividade (%)
UT1	6,03	LVd	0-3
UT2	26,31	LVd	3-8
UT3	28,42	LVd	8-20
UT4	1,34	LVd	20-45
UT5	0,01	LVd	45+
UT6	3,12	NVdf	0-3
UT7	14,02	NVdf	3-8
UT8	17,18	NVdf	8-20
UT9	1,40	NVdf	20-45
UT10	0,02	NVdf	45+
UT11	0,10	LVaf	0-3
UT12	0,44	LVaf	3-8
UT13	0,51	LVaf	8-20
UT14	0,04	LVaf	20-45
UT15	0,00	LVaf	45+
UT16	0,13	NBa	0-3
UT17	0,48	NBa	3-8
UT18	0,43	NBa	8-20
UT19	0,01	NBa	20-45

LVd - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico; NVdf - NITOSSOLO VERMELHO Distrófico típico; NBa -NITOSSOLO BRUNO Alumínico típico; LVaf - LATOSSOLO VERMELHO Aluminoférrico húmico.

As Unidades de Terra compostas por LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico e sob NITOSSOLO VERMELHO Distrófico típico ocupam 98% da área total do município. Em tais Unidades, assim como em praticamente toda a área geográfica de Passo Fundo, a classe de relevo predominante é suave ondulado e ondulado, correspondendo a 87% da área.

As UT de ocorrência de LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico (LVd) representam 62% da área e caracterizam-se, principalmente, por apresentarem solos de baixa fertilidade natural e susceptíveis à erosão. Já as UT compostas pelo NITOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (NVdf) ocupam cerca de 36% da área do município e apresentam relevo suave a ondulado. Em proporções menores estão as UT contidas sob NITOSSOLOS BRUNOS Alumínicos (NBa) e sob LATOSSOLOS VERMELHOS Aluminoférricos (LVaf) que juntas representam apenas 2% da área do município.

Tanto os LATOSSOLOS VERMELHOS quando os NITOSSOLOS BRUNOS e VERMELHOS presentes na região de Passo Fundo caracterizam-se por serem solos profundos, bem drenados, de textura argilosa e muito argilosa conforme demonstrado na

caracterização dos perfis (Anexo 1). Entretanto, são solos com baixa fertilidade natural, com médio a baixo teor de matéria orgânica, ácidos, pobres em fósforo disponível e com problemas de Al trocável. Além disso, são solos facilmente erosíveis, e as principais limitações ao uso agrícola estão relacionadas à fertilidade, à acidez e, quando em regiões de relevo ondulado, à erosão.

Caracterizado por um relevo suave ondulado a ondulado e por solos que apresentam restrições quanto a fertilidade, o uso atual das terras em Passo Fundo é predominantemente com lavouras anuais, conforme observado no mapa de uso da terra (Figura 9). Este tipo de uso encontra-se distribuído uniformemente por toda a área mapeada, em praticamente todos os tipos de solos.

Em Frederico Westphalen, foram identificadas todas as classes de declividade consideradas pela metodologia, para os três tipos de solos mapeados no município. O cruzamento dos fatores “solo” e “declividade” resultou em 15 Unidades de Terra conforme Figura 20.

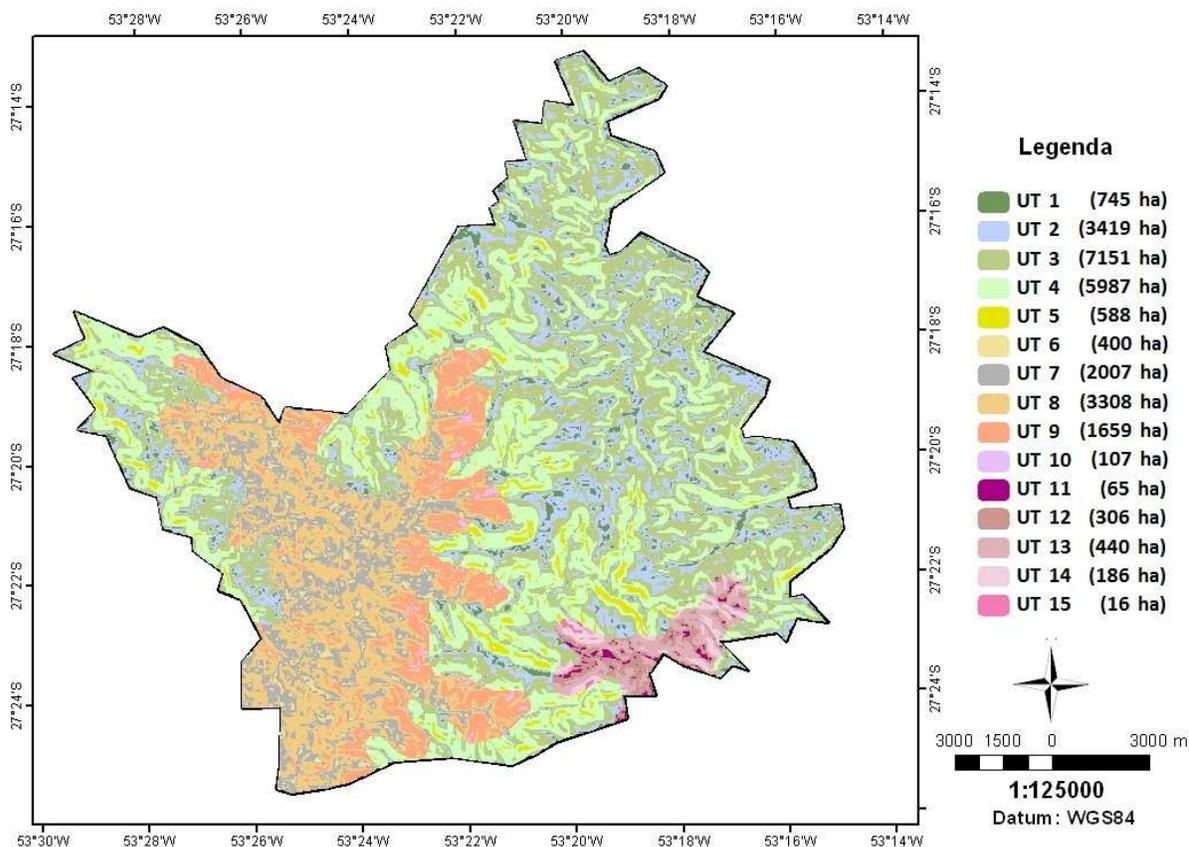


Figura 20 – Unidades de Terra em Frederico Westphalen, RS.

As Unidades de Terra com ocorrência de CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico (CXve) representaram 68% da área total do município e caracterizam-se por possuírem relevo ondulado e fortemente ondulado (Tabela 5). Os CAMBISSOLOS HÁPLICOS presentes em Frederico Westphalen são solos medianamente profundos, pouco desenvolvidos e caracterizados pela presença de um horizonte B incipiente (B câmbico). São solos de textura argilosa, com horizonte A moderado, bem drenados e pedregosos, conforme demonstrado no Anexo 1. Apresentam boa fertilidade natural, entretanto são pobres em fósforo disponível. Uma das principais limitações desse tipo de solo é a susceptibilidade à erosão, devido, principalmente, à profundidade mediana e presença de pedregosidade, características que constituem a principal restrição ao uso agrícola. Apesar das restrições e fragilidade associadas a este tipo de solo e da declividade predominante nessas áreas, as mesmas vêm sendo utilizadas, principalmente, com culturas anuais e pastagens, conforme demonstrado no mapa de uso atual das terras (Figura 10).

Tabela 5 – Unidades de Terra com seus respectivos percentuais de área, classes de solo e de declividade em Frederico Westphalen, RS

Unidade de Terra (solo x declividade)	Área (%)	Classe de Solo	Classe de Declividade (%)
UT1	2,80	CXve	0-3
UT2	13,00	CXve	3-8
UT3	27,10	CXve	8-20
UT4	22,70	CXve	20-45
UT5	2,00	CXve	45+
UT6	1,50	LVdf	0-3
UT7	7,60	LVdf	3-8
UT8	12,50	LVdf	8-20
UT9	6,30	LVdf	20-45
UT10	0,40	LVdf	45+
UT11	0,20	NVef	0-3
UT12	1,20	NVef	3-8
UT13	1,70	NVef	8-20
UT14	0,70	NVef	20-45
UT15	0,10	NVef	45+

CXve - CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico; LVdf - LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO típico; NVef - NITOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico.

Com relação às Unidades de Terra com ocorrência de LATOSSOLO VERMELHO Distroférico (LVdf), estas representam 28% da área e apresentam na maior parte relevo suave ondulado e ondulado (Tabela 5). Os LATOSSOLOS VERMELHOS caracterizam-se por serem solos de textura muito argilosa, bem drenados e com horizonte A moderado. São solos profundos e com indícios de erosão moderada. Apresentam fertilidade natural limitada, baixos teores de fósforo e problemas de Al trocável. As áreas sob este tipo de solo em Frederico Westphalen são utilizadas, na maioria das vezes, com pastagens, fato que pode estar relacionado às limitações nutricionais deste tipo de solo ou, ao nível tecnológico adotado pelos produtores dessas áreas e, até mesmo, a questões culturais que levam a adotar esse tipo de uso.

Em proporções menores estão as Unidades de Terra compostas por NITOSSOLOS VERMELHOS Eutroféricos típico, que representam apenas 4% da área mapeada. Os solos dessas unidades são profundos, bem drenados, de textura argilosa e com boa fertilidade natural. Essas áreas apresentam predominância de relevo ondulado e vêm recebendo uso, na maior parte, com pastagem natural e com cultura anual.

Embora as Unidades de Terra em Frederico Westphalen apresentem classes de declividade bastante diversificadas, observa-se um grande predomínio de área com relevo ondulado (8-20%) e fortemente ondulado (20-45%), as quais totalizam 70% da área do município. As áreas de relevo suave ondulado (3-8%) representam 22%, enquanto as áreas planas e montanhosas apenas 5% e 3% respectivamente.

3.3.2 Classificação da aptidão agrícola das terras

Aptidão agrícola das terras de Passo Fundo

Conforme apresentado na Figura 21, a classificação da aptidão agrícola em Passo Fundo resultou em nove classes de uso, excluindo a área urbana e as áreas de remanescentes florestais, as quais não foram consideradas na avaliação da aptidão.

A baixa fertilidade natural tanto dos LATOSSOLOS VERMELHOS quanto dos NITOSSOLOS daquela região, aliado à susceptibilidade natural à erosão, que se agrava em áreas de relevo ondulado, limitaram o uso sem aplicação de investimentos, caracterizando as terras do município como inaptas ao uso mais intensivo no nível de manejo A. Nos demais níveis de manejo (B e C), as Unidades de Terra foram classificadas com aptidão boa, regular ou restrita. Em proporções menores, também foram identificadas áreas aptas para pastagem

plantada (4P, 4p, 4(p)) e áreas destinadas à conservação, identificadas com o número 6, conforme recomendado pela metodologia.

Dentre os fatores condicionantes intervenientes na aptidão agrícola das terras de Passo Fundo, a deficiência de fertilidade, ocasionada, particularmente, pelo alto teor de Al^{3+} , pela deficiência em fósforo disponível, e a susceptibilidade à erosão foram considerados os mais limitantes.

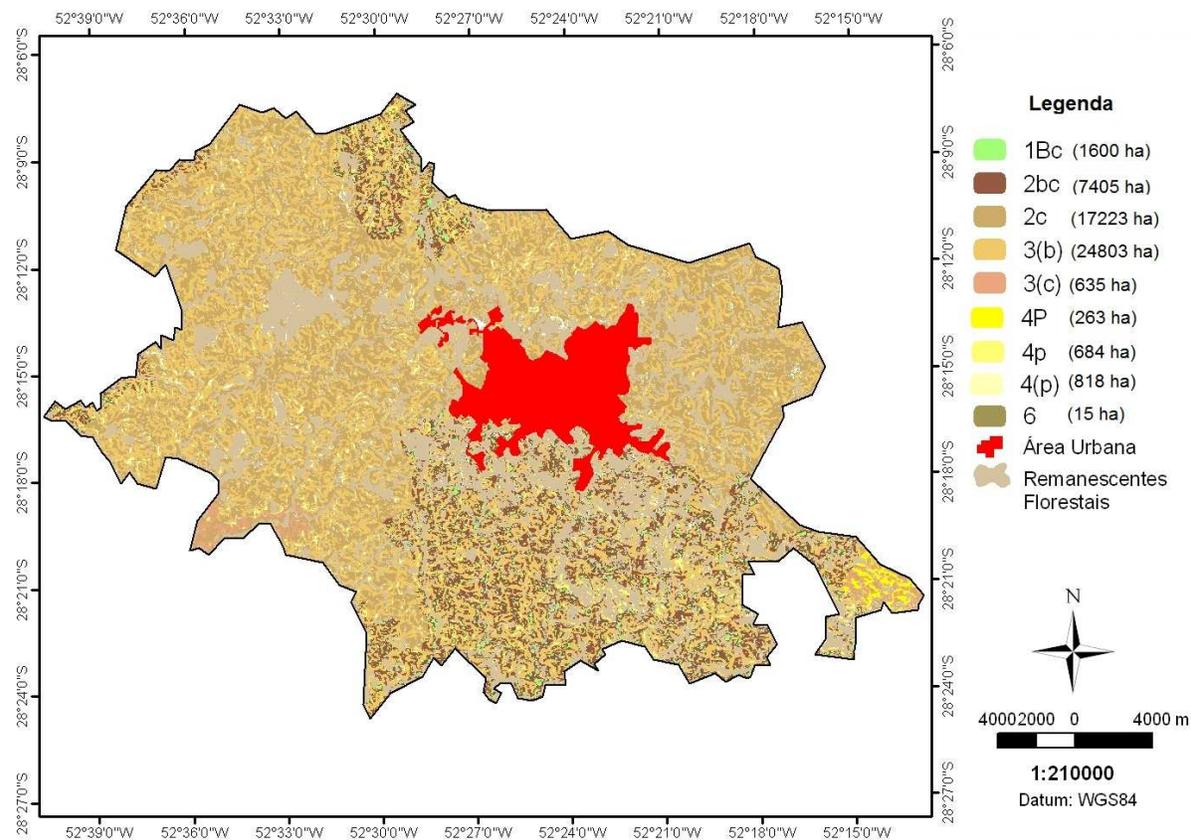


Figura 21 - Classificação da aptidão agrícola das terras em Passo Fundo, RS.

1Bc - Terras com aptidão boa para a cultura da soja e outros grãos no nível de manejo B e regular no nível de manejo C por limitação relacionada à, deficiência de fertilidade; 2bc - Terras com aptidão regular para a cultura da soja e outros grãos no nível de manejo B e C por limitação devido à deficiência de fertilidade, suscetibilidade a erosão e impedimento à mecanização; 2c - Terras com aptidão regular para a cultura da soja e outros grãos no nível de manejo C por limitação devido à deficiência de fertilidade; 3(b) - Terras com aptidão restrita para a cultura da soja e outros grãos no nível de manejo B por limitação devido à suscetibilidade a erosão e impedimento à mecanização; 3(c) - Terras com aptidão restrita para a cultura da soja e outros grãos no nível de manejo C por limitação devido à impedimento à mecanização; 4P - Terras com aptidão boa pra pastagem plantada; 4p - Terras com aptidão regular para pastagem plantada devido a limitação por deficiência de fertilidade, suscetibilidade à erosão e impedimento à mecanização; 4(p) - Terras com aptidão restrita para pastagem plantada devido a limitação por deficiência de fertilidade, suscetibilidade à erosão e; 6 - Terras sem aptidão agrícola, destinadas à conservação.

A classificação da aptidão agrícola das terras em Passo Fundo demonstrou que 97% da área avaliada (excluindo área urbana e remanescentes florestais) apresenta aptidão para uso mais intensivo, no caso com soja e outras culturas anuais (Figura 21), sendo 3% da classe de aptidão boa (1Bc), 46% da classe de aptidão regular (2bc e 2c) e 48% da classe de aptidão restrita (3(b) e 3(c)). Essa classificação é concordante com o zoneamento pedoclimático para a cultura da soja efetuado por Chagas et al. (2000), utilizando o *Automated Land Evaluation System* (ALES), que indica 100% de área apta do município para a soja plantada entre 11 de outubro a 10 de dezembro. Em proporções menores, também foram identificadas áreas aptas para pastagem plantada, cerca de 3%, definidas como 4P, 4p e 4(p) e áreas sem aptidão para o uso agrícola (0,03%), mas indicadas para conservação da fauna e da flora (6).

A maior parte da área classificada como apta para uso com soja em Passo Fundo corresponde às Unidades de Terra compostas por LATOSSOLOS VERMELHOS Distróficos húmicos, em relevo plano, suave ondulado e ondulado, representando 62% da área. Deste total, 32% foi classificado com aptidão regular para os níveis de manejo C e 30% com aptidão restrita para o nível B. A classificação da aptidão como regular no nível de manejo C das UT sob LATOSSOLOS VERMELHOS foi devida, particularmente, à baixa fertilidade natural dos solos enquanto que a aptidão restrita no nível de manejo B é atribuída aos fatores condicionantes, susceptibilidade à erosão e impedimento à mecanização, tendo em vista que essas UT estão localizadas em áreas com maiores declividades. A ausência de aptidão agrícola no nível de manejo A foi devido, particularmente, à baixa fertilidade natural dos solos nessas UT. Assim, o uso mais intensivo dessas áreas com lavouras requer a adoção de práticas que viabilizem a produtividade e de conservação dos solos. Ramalho Filho e Beek (1995) apontam como práticas para o melhoramento da fertilidade do solo a adubação verde, aplicação de NPK, correção do solo e rotação de culturas. E, no caso da susceptibilidade à erosão, as práticas de melhoramento estão associadas aos níveis de manejo B e C, podendo citar: preparo reduzido do solo, cultivo em faixas, cobertura morta (*mulching*), construção de terraços e controle de voçorocas.

Parte das UT classificadas como aptas para soja e outras culturas de grãos em Passo Fundo encontram-se também sob áreas de NITOSSOLOS VERMELHOS Distroféricos típicos, as quais respondem por 35% da área total avaliada. Desses 35% cerca de 3% apresentou aptidão boa no nível de manejo B (1Bc), 14% foi classificada com aptidão regular

nos níveis de manejo B e C (2bc) e 17% com aptidão restrita no nível de manejo B (3(b)). A atribuição da classe de aptidão regular nos níveis de manejo B e C foi devido aos fatores limitantes *Deficiência de Fertilidade*, *Susceptibilidade à Erosão* e *Impedimento à Mecanização*, sendo esses dois últimos condicionantes da classificação de aptidão restrita no nível de manejo B em 17% da área.

As Unidades de Terra sob LATOSSOLOS VERMELHOS Distróficos húmicos e NITOSSOLOS VERMELHOS Distroférricos típicos localizadas em relevo fortemente ondulado foram classificadas, respectivamente, com aptidão restrita e regular para uso com pastagem plantada (4p e 4(p)), e aquelas sob relevo montanhoso foram destinadas à conservação (6). As áreas aptas para pastagem plantada sob esses dois tipos de solos corresponderam a, aproximadamente, 3% da área total avaliada e a área destinada à conservação a menos de 0,5%. A Tabela 6 ilustra os graus de limitação dos fatores condicionantes e as classes de aptidão agrícola de cada UT do município de Passo Fundo.

Com relação às Unidades de Terra compostas por NITOSSOLOS BRUNOS Alumínicos e por LATOSSOLOS VERMELHOS Aluminoférricos, estas constituem menos de 3% em termos da área total submetida à classificação no município de Passo Fundo e, em tais unidades, quase não foram identificadas topografia superior a 45% de declividade (Tabela 6).

Assim, como as UT localizadas sob área de LATOSSOLOS VERMELHOS Distróficos e de NITOSSOLOS VERMELHOS Distroférricos, essas Unidades de Terra apresentaram como principais fatores limitantes a deficiência de fertilidade, manifestada principalmente pelo alto teor de Al trocável e deficiência em fósforo, além da susceptibilidade à erosão. As UTs compostas por NITOSSOLOS BRUNOS foram classificadas com aptidão regular (2c) e restrita (3(c)) para uso com soja e outras culturas anuais no nível de manejo C. A soma das áreas ocupadas por essas UT correspondeu a 0,6% da área avaliada. Área apta ao uso com pastagem plantada (4P, 4p e 4(p)) foi equivalente a 0,4%.

Com relação às UT compostas por LATOSSOLOS VERMELHOS Aluminoférricos, essas foram classificadas com aptidão regular (2c) e restrita (3 (c)) no nível de manejo C totalizando cerca de 1% da área. As áreas mais íngremes (0,04%) foram classificadas como inaptas à agricultura, sendo destinadas à conservação.

Tabela 6 – Graus de limitação dos fatores condicionantes e classificação da aptidão agrícola das terras em Passo Fundo (RS), segundo a metodologia de Ramalho Filho e Beek (1995)

Unidade de Terra	Classe de Solo	Classe de Declive (%)	Área (ha)	Área (%)	Deficiência de Fertilidade (n)			Deficiência Hídrica (w)			Excesso de água (o)			Suscetibilidade a Erosão (e)			Impedimento à mecanização (m)			Aptidão Agrícola das Terras	
					A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	Classe	A.L
UT1	LVd	0-3	4694	6,03	F	M1	<u>N2</u>	L	L	<u>N2</u>	N	N	N	N/L	<u>N1</u>	<u>N1</u>	N	N	N	2c	n
UT2		3-8	20480	26,31	F	M1	<u>N2</u>	L	L	<u>N2</u>	N	N	N	M	<u>L1</u>	N2	L	L	L	2c	n
UT3		8-20	22116	28,42	F	M1	<u>N2</u>	L	L	<u>N2</u>	N	N	N	M/F	M1	M1	M/F	M/F	M/F	3(b)	e, m
UT4		20-45	1043	1,34	F	M1	<u>N2</u>	L	L	<u>N2</u>	N	N	N	F	F	F	F	F	F	4(p)	e
UT5		45+	1,2	0,01	F	M1	<u>N2</u>	L	L	<u>N2</u>	N	N	N	MF	MF	MF	MF	MF	MF	6	m
UT6	NVdf	0-3	2430	3,12	M/F	<u>L1</u>	<u>N2</u>	N/L	N/L	N/L	N	N	N	N/L	<u>N1</u>	<u>N1</u>	N	N	N	1Bc	n
UT7		3-8	10916	14,02	M/F	<u>L1</u>	<u>N2</u>	N/L	N/L	N/L	N	N	N	L/M	<u>L1</u>	<u>N2</u>	L	L	L	2bc	n, e, m
UT8		8-20	13375	17,18	M/F	<u>L1</u>	<u>N2</u>	N/L	N/L	N/L	N	N	N	M/F	<u>M1</u>	<u>M1</u>	M	M	M	3(b)	e, m
UT9		20-45	1087	1,40	M/F	<u>L1</u>	<u>N2</u>	N/L	N/L	N/L	N	N	N	F	F	F	F	F	F	4p	e, m
UT10		45+	16	0,02	M/F	<u>L1</u>	<u>N2</u>	N/L	N/L	N/L	N	N	N	MF	MF	MF	MF	MF	MF	6	m
UT11	NBa	0-3	104	0,13	F	<u>M1</u>	<u>N2</u>	N/L	N/L	N/L	N	N	N	N/L	<u>N1</u>	<u>N1</u>	N	N	N	2c	n
UT12		3-8	373	0,48	F	<u>M1</u>	<u>N2</u>	N/L	N/L	N/L	N	N	N	L/M	<u>L1</u>	<u>N2</u>	L	L	L/M	3(c)	m
UT13		8-20	334	0,43	MF	<u>M1</u>	<u>N2</u>	N/L	N/L	N/L	N	N	N	M/F	<u>M1</u>	<u>M1</u>	M	M	M/F	4P	n, e
UT14		20-45	10	0,01	MF	<u>F1</u>	<u>L2</u>	N/L	N/L	N/L	N	N	N	F	F	F	F	F	F	4(p)	n
UT15	LVaf	0-3	78	0,10	MF	M/F <u>1</u>	<u>L2</u>	L	L	<u>N2</u>	N	N	N	N/L	<u>N1</u>	<u>N1</u>	N	N	N	2c	n
UT16		3-8	341	0,44	MF	M/F <u>1</u>	<u>L2</u>	L	L	<u>N2</u>	N	N	N	M	<u>L1</u>	N2	L	L	L	2c	n, m
UT17		8-20	398	0,51	MF	M/F <u>1</u>	<u>L2</u>	L	L	<u>N2</u>	N	N	N	M/F	M1	M1	M/F	M/F	M/F	3(c)	e, m
UT18		20-45	34	0,04	MF	M/F <u>1</u>	<u>L2</u>	L	L	<u>N2</u>	N	N	N	F	F	F	F	F	F	4p	n, e, m
UT19		45+	0,10	0,0002	MF	M/F <u>1</u>	<u>L2</u>	L	L	<u>N2</u>	N	N	N	MF	MF	MF	MF	MF	MF	6	m

* LVd - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico; NVdf - NITOSSOLO VERMELHO Distrófico típico; NBa -NITOSSOLO BRUNO Alumínico típico; LVaf - LATOSSOLO VERMELHO Aluminoférrico húmico. **Fatores condicionantes: n =Deficiência de fertilidade; w = Deficiência hídrica; o = Excesso de água; e = Suscetibilidade a erosão; m = Impedimento à mecanização. ***Graus de limitação: N = Nulo; L = Ligeiro; M = Moderado; F = Forte; MF = Muito Forte.****Níveis de viabilidade de melhoria: 1= Melhoria viável com práticas simples e pequeno emprego de capital; 2 = Melhoria viável com práticas intensivas e mais sofisticadas e considerável emprego de capital. A ausência de algarismo sublinhado acompanhado a letra representativa do grau de limitação indica não haver possibilidade de melhoria daquele fator limitativo. A.L= atributo limitante.

Quanto ao fator limitante *Disponibilidade Hídrica*, todas as Unidades de Terra identificadas em Passo Fundo apresentam grau de limitação nulo a ligeiro ao cultivo de lavouras anuais, devido a períodos eventuais de estiagem, que ocorrem e prejudicam principalmente as safras de verão. O balanço hídrico sequencial para a cultura da soja demonstrou haver ocorrência de déficits hídricos no solo em determinados períodos em que a cultura se encontra em campo. Com relação ao fator *Excesso de Água* ou *Deficiência de Oxigênio*, o grau de limitação foi considerado nulo, tendo em vista serem solos que apresentam boa drenagem natural.

Ainda, com relação aos LATOSSOLOS VERMELHOS Distróficos típicos, os resultados das análises físicas e químicas das amostras coletadas no campo experimental da Embrapa Trigo (Anexo 2) demonstram incidência de compactação na profundidade de 0 a 30 cm. Segundo Denardin et al. (2008), a ocorrência de acentuada estratificação química e física nos primeiros 20 cm de solo condiciona a concentração de raízes na camada superficial, enquanto na camada subsuperficial ocorreria a degradação da estrutura do solo por compactação. Sendo assim, ocorrendo deficiência hídrica, seja por distribuição irregular das chuvas durante o ano, seja por limitação da ascensão da água da camada subsuperficial pouco permeável para as raízes das plantas dispostas superficialmente, poderá ocorrer quebra de produção.

Aptidão agrícola das terras de Frederico Westphalen, RS

Dentre os fatores condicionantes intervenientes na aptidão agrícola das terras do município de Frederico Westphalen, deficiência de fertilidade e susceptibilidade à erosão também aparecem como os mais limitantes. Deficiência de fertilidade é uma qualidade associada à ocorrência dos LATOSSOLOS VERMELHOS Distroféricos, sendo manifestada principalmente pela baixa saturação por base (%V) e alta concentração de Al^{3+} . Já a susceptibilidade à erosão é mais expressiva nas áreas de CAMBISSOLOS HÁPLICOS, devido ao relevo mais movimentado e o solo menos desenvolvido, com elevados teores de silte, que não condicionam boa agregação.

Conforme apresentado na Figura 22, a classificação da aptidão agrícola das terras em Frederico Westphalen resultou em 10 classes de uso, excluindo área urbana e áreas de remanescentes florestais, as quais não foram incluídas na avaliação.

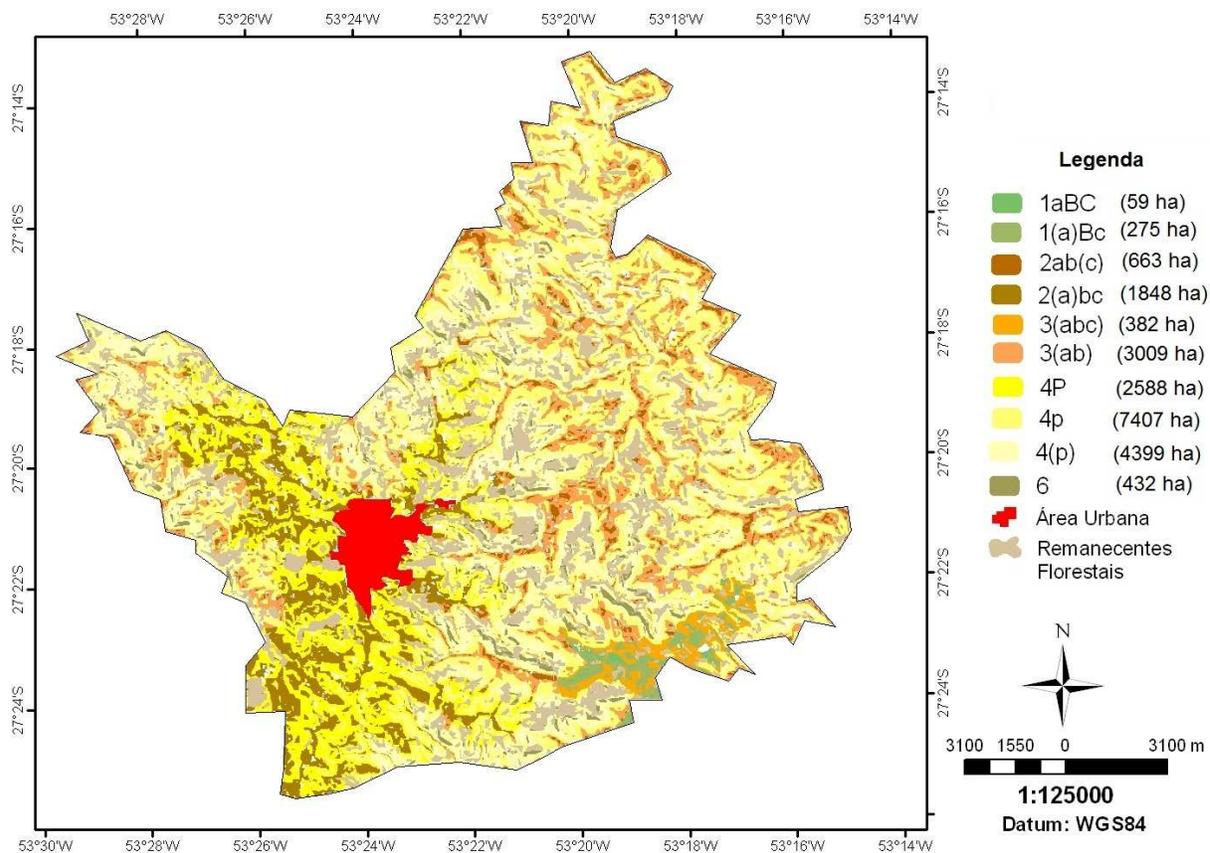


Figura 22 – Classificação da aptidão agrícola das terras em Frederico Westphalen (RS).

1aBC - Terras com aptidão regular no nível de manejo A devido limitação por deficiência de fertilidade, e Boa para a cultura da soja e outros grãos no nível de manejo B e C; 1(a)Bc - Terras com aptidão restrita para a cultura da soja e outros grãos no nível de manejo A devido limitação por deficiência de fertilidade, aptidão boa no nível de manejo B e regular no nível de manejo C; 2ab(c) - Terras com aptidão regular para a cultura da soja e outros grãos no nível de manejo A e B por limitação devido à deficiência de fertilidade, suscetibilidade a erosão e impedimento à mecanização e restrita no nível de manejo c; 2(a)bc - Terras com aptidão restrita para a cultura da soja e outros grãos no nível de manejo A e regular nos níveis de manejo B e C por limitação devido à deficiência de fertilidade, suscetibilidade a erosão e impedimento à mecanização; 3(abc) - Terras com aptidão restrita para a cultura da soja e outros grãos no nível de manejo A, B e C por limitação devido à deficiência de fertilidade, suscetibilidade a erosão e impedimento à mecanização; 3(ab) - Terras com aptidão restrita para a cultura da soja e outros grãos no nível de manejo A e B por limitação devido suscetibilidade a erosão e impedimento à mecanização; 4P - Terras com aptidão boa para pastagem plantada; 4p - Terras com aptidão regular para pastagem plantada devido a limitação por suscetibilidade a erosão e impedimento à mecanização; 4(p) - Terras com aptidão restrita para pastagem plantada devido a limitação por suscetibilidade a erosão e impedimento à mecanização; 6 – Terras sem aptidão agrícola, destinadas à conservação.

A avaliação da aptidão demonstrou que mais da metade das terras avaliadas foram classificadas como inaptas para uso mais intensivo com soja e outras culturas anuais, sendo, entretanto, aptas para uso com pastagem plantada (4P, 4p e 4(p)). Em proporções menores,

foram identificadas áreas aptas para lavoura (1aBC, 1(a)Bc, 2ab(c), 2(a)bc, 3(abc), 3(ab) e áreas destinadas à conservação (6). A avaliação da aptidão agrícola de cada Unidade de Terra do município de Frederico Westphalen, bem como os principais fatores limitantes associados a cada UT constam da Tabela 7.

As terras classificadas como aptas ao uso com pastagem plantada representam 68% da área total, sendo 12% de aptidão boa (4P), 34% regular (4p) e 22% restrita (4(p)) (Figura 22). As Unidades de Terra classificadas como boas para pastagem plantada são de ocorrência de Latossolos Vermelhos em relevo ondulado e aquelas classificadas como sendo de aptidão regular e restrita em sua maior parte englobam CAMBISSOLOS HÁPLICOS, também em relevos ondulado e fortemente ondulado. A classificação da aptidão das áreas de Cambissolos Háplicos como regular e restrita para uso com pastagem foi devido à presença de pedregosidade neste tipo de solo, aos indícios de erosão e ao relevo acidentado predominante nessas áreas. Esses atributos levaram à atribuição de graus de limitação forte e muito forte aos fatores condicionantes *Susceptibilidade à Erosão* e *Impedimento à mecanização*, condicionando, assim, tal classificação da aptidão agrícola.

Dentre os 68% da área indicada para uso com pastagem plantada, cerca de 50% são de ocorrência de CAMBISSOLOS HÁPLICOS, os quais encontram-se em processo erosivo e em avançado estágio de degradação. Na descrição do perfil do solo realizada na área de estudo (FLORES, 2009), foi possível detectar a presença de pedregosidade e indícios de degradação, caracterizado pela incidência de processo erosivo nessas áreas. Segundo Streck et al. (2008), os CAMBISSOLOS HÁPLICOS daquela região teriam sido CHERNOSSOLOS ARGILÚVICOS degradados pelo intenso uso agrícola, que resultaram na erosão do horizonte A chernozêmico original. Sendo assim, considerando que as áreas de CAMBISSOLOS HÁPLICOS aptas ao plantio de pastagem são, também, aptas ao uso com reflorestamentos, que constitui uma alternativa de uso menos intensivo, comparativamente à pastagem, pode se inferir que a utilização dessas áreas com espécies florestais manejadas de forma adequada poderá proporcionar benefícios sustentáveis para conservação das mesmas.

No mapa de uso atual das terras (Figura 10), observa-se que a utilização das áreas de CAMBISSOLOS HÁPLICOS com culturas anuais, manejadas sob sistema plantio direto, é bastante comum em Frederico Westphalen, até mesmo nas áreas de relevo mais acidentado. Pode-se induzir que isso ocorre devido à melhor fertilidade deste tipo de solo,

comparativamente ao LATOSSOLO VERMELHO lá predominante. Entretanto, conforme já mencionado, não se pode atribuir essa ocupação exclusivamente ao critério “melhor fertilidade química” dessas áreas, pois outros fatores tais como nível do manejo adotado naquela região e perfil socioeconômico também podem estar influenciando essa ocupação da terra.

Quanto ao fator limitante *Disponibilidade Hídrica*, as Unidades de Terra localizadas em áreas de CAMBISSOLOS apresentam grau de limitação moderado ao cultivo de lavouras anuais, devido aos eventuais períodos de estiagem, que ocorrem e prejudicam principalmente as safras de verão. O balanço hídrico sequencial para a cultura da soja demonstrou haver ocorrência de déficits hídricos no solo em determinados períodos em que a cultura se encontra em campo. Além disso, a incidência de alto teor de silte neste tipo de solo proporciona uma menor retenção de água, conferindo uma estrutura menos permeável, portanto, uma menor capacidade de retenção de água. Quanto ao fator *Excesso de Água* ou deficiência de oxigênio, o grau de limitação foi considerado nulo, tendo em vista serem solos que apresentam boa drenagem natural, segundo a descrição do perfil em campo (FLORES, 2009).

Unidades de Terra localizadas em relevo com declividades superiores a 8% em áreas de CAMBISSOLOS, que correspondem a 51% da área avaliada, apresentam fortes restrições quanto ao uso de mecanização, que se tornam ainda mais graves devido à presença de pedregosidade e incidência de processos erosivos neste tipo de solo, conforme já mencionado. Tais critérios levaram a classificar essas Unidades de Terra com aptidão regular e restrita para pastagem plantada (49%) e, quando localizadas em declividades superiores a 45% de declividade, foram indicadas à conservação (2%). Ainda, com relação às Unidades de Terras sob CAMBISSOLO HÁPLICO, cerca de 17,5% da área avaliada, localizada sob este tipo de solo, apresentou aptidão regular para cultura da soja nos níveis de manejo A, B e restrita no nível de manejo C (2ab(c)) e aptidão restrita nos níveis A e B (3(ab)).

Com relação às áreas aptas ao plantio de cultura anual, 29,6 % da área avaliada no município apresentou algum tipo de aptidão para este tipo de uso, seja a aptidão boa, regular ou restrita (Figura 22 e Tabela 7). Este valor corrobora o encontrado por Chagas et al. (2000) que foi de 30% para a mesma localidade, na avaliação da aptidão utilizando a metodologia ALES. A maioria das áreas aptas ao plantio de cultura anual está localizada em áreas de LATOSSOLOS VERMELHOS, apesar das Unidades de Terra localizadas sob este tipo de solo mostrar certa limitação quanto à deficiência de fertilidade. Os LATOSSOLOS

VERMELHOS presentes em Frederico Westphalen são solos profundos, bem drenados, porém, possuem baixa reserva de nutrientes e deficiência em fósforo, além de alto teor de Al^{+} trocável. Mesmo apresentando tais restrições relacionadas à fertilidade, este tipo de solo possibilita uma aptidão regular e restrita nos níveis de manejo A, B e C (2(a)bc) conforme demonstrado no quadro de avaliação da aptidão (Tabela 7).

Tabela 7 – Graus de limitação dos fatores condicionantes e classificação da aptidão agrícola das terras em Frederico Westphalen (RS), segundo a metodologia de Ramalho Filho e Beek (1995)

Unidade de Terra	Classe de Solo	Classe de Declive (%)	Área (ha)	Área (%)	Deficiência de Fertilidade (n)			Deficiência Hídrica (w)			Excesso de água (o)			Suscetibilidade a Erosão (e)			Impedimento à mecanização (m)			Aptidão Agrícola das Terras	
					A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B
UT 1	CXve	0-3	745	2,8	L	N ₁	N ₁	M	M	M	L/M	L1	L1/N	M	L/M ₁	N ₂	M	M	L2	2ab(c)	n, e, m
UT 2		3 - 8	3419	13,0	L	N ₁	N ₁	M	M	M	L/M	L1	L1/N	M/F	LM ₁	L ₂	F	F	M2	3(ab)	e, m
UT 3		8-20	7151	27,1	L	N ₁	N ₁	M	M	M	L/M	L1/N	L2/N	F	M/F1	M/F2	F	F	M/F ₂	3(a)/ 4p	e, m
UT 4		20-45	5987	22,7	L	L ₁	L ₁	M	M	M	L	N1	N1/N	MF	MF	MF	F	F	F	4(p)	e, m
UT 5		45+	588	2	L	L ₁	L ₁	M	M	M	L	N1	N1	MF	MF	MF	MF	MF	MF	6	e, m
UT 6	LVdf	0-3	400	1,5	L/M	L ₁	N ₂	L	L	N2	N	N	N	N/L	N ₁	N ₁	N	N	N	2(a)bc	n
UT 7		3 - 8	2007	7,6	L/M	L ₁	N ₂	L	L	N2	N	N	N	M	L ₁	N ₂	L	L	L	2(a)bc	n, e, m
UT 8		8-20	3308	12,5	L/M	L ₁	N ₂	L	L	N2	N	N	N	M/F	M ₁	M ₁	M/F	M/F	M/F	4P,3(ab)	e, m
UT 9		20-45	1659	6,3	L/M	L ₁	N ₂	L	L	N2	N	N	N	F	F	F	F	F	F	3(a), 4p	e, m
UT 10		45+	107	0,4	L/M	L ₁	N ₂	L	L	N2	N	N	N	MF	MF	MF	MF	MF	MF	6	e, m
UT 11	NVef	0-3	65	0,2	L/M	N ₁	N ₁	N/L	N/L	N/L	N	N	N	N/L	N ₁	N ₁	N	N	N	1aBC	n
UT 12		3 - 8	306	1,2	L/M	N ₁	N ₁	N/L	N/L	N/L	N	N	N	L/M	L ₁	N ₂	L	L	L	1(a)Bc	n
UT 13		8-20	440	1,7	L/M	N ₁	N ₁	N/L	N/L	N/L	N	N	N	M/F	M ₁	M ₁	M	M	M	3(abc)	n, e, m
UT 14		20-45	186	0,7	L/M	N ₁	N ₁	N/L	N/L	N/L	N	N	N	F	F	F	F	F	F	4p	e, m
UT 15		45+	16	0,1	L	L ₁	N2	N/L	N/L	N/L	N	N	N	MF	MF	MF	MF	MF	MF	6	e, m

*Fatores condicionantes: n =Deficiência de fertilidade; w = Deficiência hídrica; o = Excesso de água; e = Suscetibilidade a erosão; m = Impedimento à mecanização. **Graus de limitação: N = Nulo; L = Ligeiro; M = Moderado; F = Forte; MF = Muito Forte.***Níveis de viabilidade de melhoramento: 1: melhoramento viável com práticas simples e pequeno emprego de capital; 2: melhoramento viável com práticas intensivas e mais sofisticadas e considerável emprego de capital. A ausência de algarismo sublinhado acompanhado a letra representativa do grau de limitação indica não haver possibilidade de melhoramento daquele fator limitativo. A.L= atributo limitante.

As Unidades de Terra compostas por LATOSSOLO VERMELHO em relevo ondulado e forte ondulado em Frederico Westphalen também foram identificadas com aptidão boa e regular para pastagem plantada (19%). Um pequeno percentual, o equivalente a menos de 1%, sob área de relevo montanhoso, foi destinado à conservação.

Com relação ao fator *disponibilidade hídrica*, as Unidades de Terra sob LATOSSOLO VERMELHO apresentam limitações ao cultivo de lavouras anuais, devido a eventuais períodos de estiagem. Além disso, o balanço hídrico sequencial para a cultura da soja demonstrou haver ocorrência de déficits hídricos no solo em determinados períodos em que a cultura se encontra em campo.

A análise do fator condicionante *Susceptibilidade à Erosão* empregando os atributos “tipo de solo”, “profundidade do solo”, “classe de declividade” e a descrição do perfil cultural na área, levou a inferir que a susceptibilidade à erosão restringe o uso das áreas de LATOSSOLO VERMELHO com cultivos anuais. Isso devido, particularmente, aos indícios de erosão moderada diagnosticados na descrição do perfil cultural, realizados em campo em áreas de 8% de declividade (FLORES, 2009), ainda que, se tratando de áreas de Latossolos, os quais são considerados resistentes à erosão. Portanto, a susceptibilidade à erosão e a declividade constituem fatores limitantes ao uso de mecanização nessas áreas.

Quanto às Unidades de Terra onde ocorrem NITOSSOLOS VERMELHOS, apesar de ocuparem menos de 4% em termos da área total, foram as que apresentaram melhores condições para o cultivo de lavouras anuais, em termos de fertilidade do solo. As boas condições de fertilidade associadas a um relevo predominantemente plano permitiram a classificação dessas Unidades de Terra como aptas ao cultivo de soja nos níveis de manejo A, B e C (Tabela 7), mesmo se tratando de uma aptidão regular ou restrita. Tal restrição ocorreu, particularmente, devido ao alto teor de Al^{+3} e a deficiência em fósforo. Por outro lado, também são áreas que apresentam forte susceptibilidade natural à erosão, portanto devem ser utilizadas adotando práticas conservacionistas de manejo. Áreas mais íngremes sob NITOSSOLOS VERMELHOS foram classificadas com aptidão regular para uso com pastagem plantada e para conservação.

Ressalta-se que a classificação das Unidades de Terra para usos com lavoura, pastagem natural, pastagem plantada, silvicultura e conservação foi realizada excluindo a área urbana e áreas de remanescentes florestais como um todo.

3.4 Adequação do uso das terras

A avaliação da adequação do uso das terras foi realizada por meio do cruzamento do mapa de uso atual das terras com o mapa de avaliação da aptidão agrícola, excluindo-se as áreas de vegetação natural, área urbana, corpos d'água e áreas classificadas como solo exposto. Assim, somente as áreas ocupadas com lavoura e com pastagem foram submetidas à avaliação da adequação de uso.

A Figura 23 demonstra que a maioria das terras em Passo Fundo vem recebendo uso de acordo com o que a aptidão agrícola recomenda. Verificou-se que, dos 44.098 ha então ocupados com lavoura, cerca de 42.523 ha, ou seja, 96% de fato apresentaram aptidão para esse tipo de uso mais intensivo. Mas, cerca de 4% ocupam áreas avaliadas como inaptas para culturas e aptas para usos menos intensivos, com pastagem e conservação. O que indica que esses 4% de área vem recebendo uso acima da sua capacidade suporte.

Com relação aos 6.700 ha de terras ocupadas com pastagens, 6.515 ha, correspondente a 97%, apresentaram aptidão para uso com lavoura. Isso significa que tais áreas estão recebendo um uso menos intensivo do que a classificação da aptidão permite. Tais áreas poderiam ser utilizadas com lavouras, mas, vem sendo utilizadas com pastagens. Os outros 3% da área ocupada com pastagem apresentou aptidão para uso menos intensivo, seja com reflorestamento ou para conservação da fauna e da flora.

Sendo assim, pode se concluir que o uso atual de 84% das terras ocupadas com lavouras e pastagem em Passo Fundo está de acordo com a avaliação da aptidão agrícola conforme preconiza a metodologia de Ramalho Filho e Beek (1995) e cerca de 16% da área avaliada vem recebendo uso em desacordo com a aptidão. Desses 16%, em 12% o uso é menos intensivo do que a avaliação permite (áreas com aptidão para uso com lavouras mas, ocupadas com pastagens) e em 4% o uso está acima do recomendado pela aptidão. O fato dessas áreas estarem recebendo uso menos intensivo pode estar relacionado aos costumes regionais de determinadas localidades do município, ou simplesmente à preferência do produtor pela atividade pecuária ao invés da lavoura.

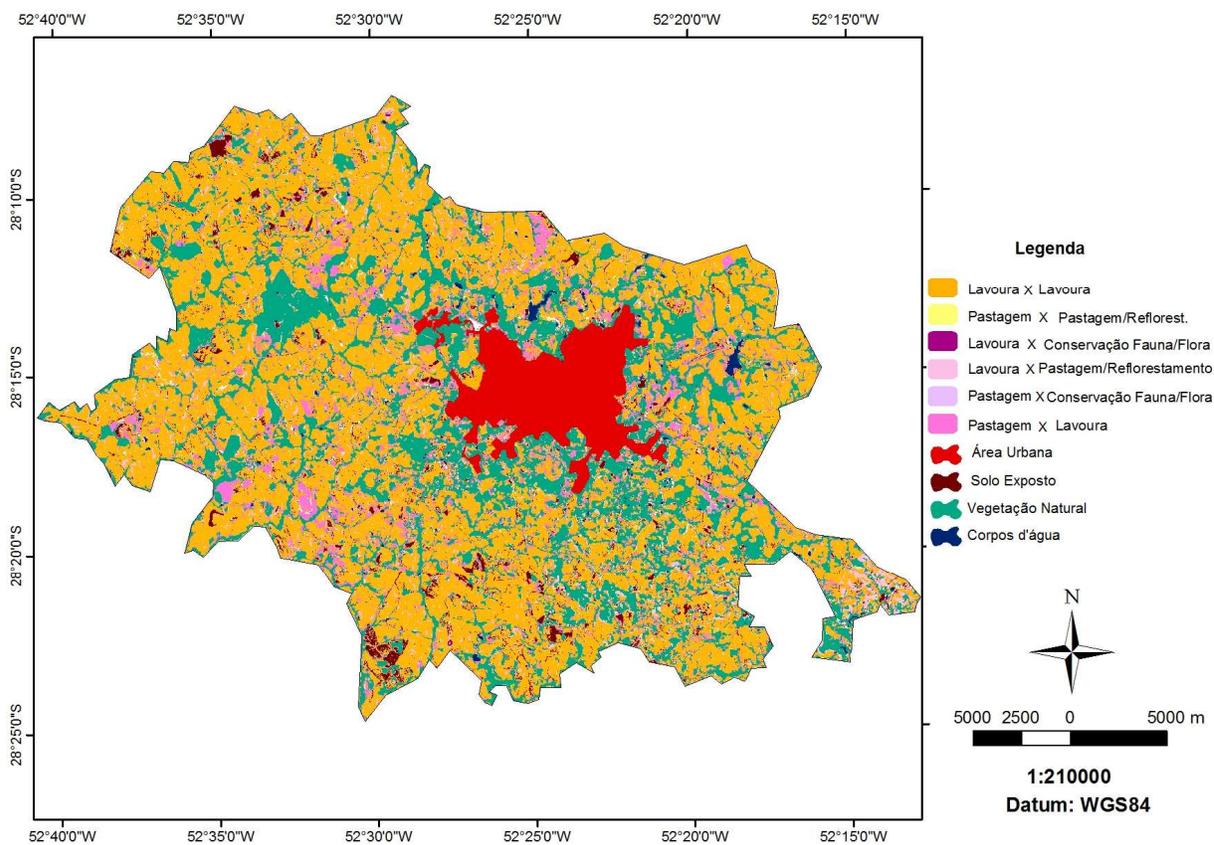


Figura 23 – Mapa de adequação de uso da terra em Passo Fundo, RS.

No que se refere à adequação do uso atual das terras em Frederico Westphalen, 54% da área do município apresentou aptidão agrícola para uso com pastagem plantada, classe de uso que responde pela maior ocupação da área do município.

Ao confrontar o mapa de uso atual com o de classificação da aptidão (Figura 24), observou-se que dos 12.700 hectares ocupados com pastagem, 68% apresentou aptidão para tal uso, 30% para uso com lavoura, e cerca de 2% não apresentou aptidão agrícola e foram indicados para conservação. Isso indica que parte da área ocupada com pastagem, o equivalente a 32%, vem sendo utilizada de forma inadequada, pois apresentam aptidão para um uso mais intensivo, com lavoura (30%), e os outros 2% com uso menos intensivo, para conservação.

Por outro lado, a área ocupada com lavoura (7.330 ha) apenas 30% apresentou aptidão agrícola para este tipo de uso, 69% apresentou aptidão para uso menos intensivo, no caso com pastagem plantada, e menos de 1% não apresentou aptidão, sendo então destinada à

conservação. Com isso, pode-se inferir que a maior parte da área ocupada com lavoura em Frederico Westphalen está recebendo um tipo de uso mais intensivo do que o recomendado pela aptidão agrícola, o que propicia a ocorrência de processos erosivos acentuados, perda de fertilidade do solo e consequentemente, redução da produtividade.

Finalmente, pode se dizer que cerca de 46% da área avaliada em Frederico Westphalen com lavoura e com pastagem, vem sendo utilizada de forma inadequada. Deste total, 27% vêm recebendo uso mais intensivo e 19% uso menos intensivo do que a avaliação da aptidão recomenda.

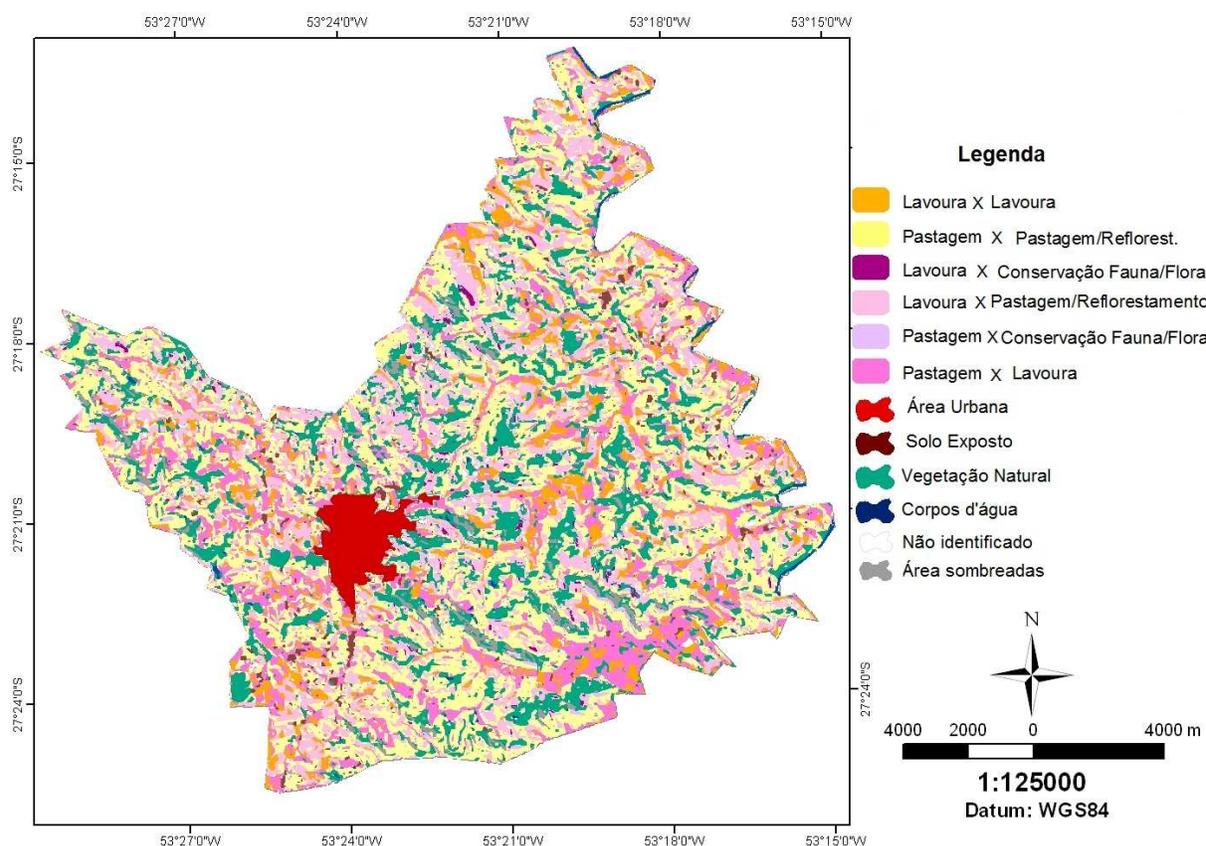


Figura 24 – Mapa de adequação de uso da terra em Frederico Westphalen, RS.

Reis e Miorin (2006) retratam a adequação do uso das terras na região do Médio Alto Uruguai no RS e classificam as atividades agropecuárias desenvolvidas em Frederico Westphalen como semi-adequadas às condições de solo e topografia do município. Esses mesmos autores mencionam que para um universo de 13 municípios estudados naquela região,

destaca-se um percentual 61,53% municípios que desenvolvem atividades sobre formas de relevo que nem sempre são adequadas ao tipo de uso. Deste modo, tal prática identifica sobreutilização dos recursos, tornando essas áreas sujeitas a processos erosivos acentuados, à perda da fertilidade do solo e redução da produtividade, agravando assim o processo de degradação.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

– O uso atual das terras em Passo Fundo é predominantemente com lavoura anual e em Frederico Westphalen é com pastagem, correspondendo, respectivamente, a 56% e 48% da área de cada município.

– De acordo com a análise agroclimática para a cultura da soja, a deficiência hídrica do solo na safra 2008/2009 em Passo Fundo não afetou a produtividade.

– A deficiência hídrica do solo durante o ciclo da soja na safra 2008/2009 em Frederico Westphalen pode ter influenciado o rendimento da cultura, e as condições dos solos intensificaram o efeito desse déficit sobre a produção.

– 97% da área do município de Passo Fundo apresentou aptidão agrícola para uso mais intensivo, que é com lavoura, e a principal restrição dos solos para o cultivo de soja neste município está relacionada à deficiência de fertilidade.

– 68% da área do município de Frederico Westphalen foi classificada com aptidão agrícola para uso com pastagem, sendo que a principal restrição dos solos neste município está relacionada ao risco natural de erosão.

– O uso atual das terras em 84% da área ocupada com lavoura e com pastagem em Passo Fundo está de acordo com a sua aptidão agrícola e 16% vêm recebendo uso em desacordo com a aptidão, sendo que em 12% o uso é menos intensivo do que a aptidão recomenda e em 4% o uso está além da sua capacidade suporte.

– Cerca de 46% da área ocupada com lavoura e com pastagem em Frederico Westphalen vem sendo utilizada de forma inadequada. Sendo que 27% vêm recebendo uso mais intensivo e 19% uso menos intensivo do que a avaliação da aptidão recomenda.

– A análise conjunta da avaliação climática da soja e da aptidão agrícola das terras em Passo Fundo leva a inferir que o uso atual da maioria das terras está de acordo com a sua aptidão agrícola.

– A análise conjunta da avaliação climática da soja e da aptidão agrícola das terras em Frederico Westphalen leva a inferir que o uso atual da maioria das terras está em desacordo com a sua aptidão agrícola.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁVILA, A. M. H.; BERLATO, M. A.; SILVA, J. B. da. Probabilidade de ocorrência de precipitação pluvial mensal igual ou maior que a evapotranspiração potencial para a estação de crescimento de culturas de primavera verão no estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 2, n. 2, p. 149-154, 1996.

BERLATO, M. A.; FONTANA D. C. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, n.1, p.119-125, 1999.

BERLATO, M. A.; FONTANA D. C. **El Niño e La Niña: Impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul**. Aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 10 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul**. Recife: [s.n.], 1973. 431p. (Boletim Técnico, 30).

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Portaria nº 124 de 27 de junho de 2008. Zoneamento agrícola para a cultura da soja no estado do RS/Safra 2008/2009. Disponível em < <http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-agricola/portarias-segmentadas-por-uf>>. Acesso em: 5 nov. 2008.

CAMARGO, O. A. de; ALLEONI, L. R. F. **Efeitos da compactação no crescimento de plantas**. 2006. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/C5/Index.htm>. Acesso em: 25 ago. 2010.

CHAGAS, C. S.; CARVALHO JUNIOR, W.; PEREIRA, N. R.; BHERING, S. B.; CUNHA, G. R.; SPERA, S. T. **Zoneamento pedoclimático do Rio Grande do Sul para a cultura da soja**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 33 p. (Documentos, 25)

CLIMATE-CHARTS. World Climate Index. Disponível em: <<http://www.climate-charts.com>>. Acesso em: 12 nov. 2008.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO RS/SC. **Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3. ed. Passo Fundo: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 1995. 233 p.

COSTAMILAN, L. M.; FERREIRA, P. E. P. Levantamento de perdas causadas pela ferrugem de soja no Rio Grande do Sul, safra 2008/09. In: GODOY, C. V.; SEIXAS, C. D. S.; SOARES, R. M. **Reunião do consórcio antiferrugem safra 2008-2009**. Londrina: Embrapa Soja, 2009. 113 p. (Documentos, 315).

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: Unicamp, 1993. 170 p.

CUNHA, G. R.; HASS, J. C.; DAMALGO, G. A.; PASINATO, A. Perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 1, p. 111-119, 1998.

CUNHA, G. R.; HAAS, J. C. **Zoneamento Agrícola**: recomendações de épocas de semeadura de soja para o estado do Rio Grande do Sul – safra 1996/97. Passo Fundo: Embrapa CNPT, 1996. 28 p. (Documentos, 29).

CUNHA, G. R.; ASSAD, E. D. Uma visão geral do número especial da RBA sobre o zoneamento agrícola no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, p. 446-459, 2001. Número Especial: Zoneamento Agrícola.

CUNHA, G. R.; BARNI, N. A.; HASS, J. C.; MALUF, J. R. T; MATZENAUER, R.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M. B. M.; PIRES, J. L. F. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, p. 446-459, 2001. Número Especial: Zoneamento Agrícola.

CUNHA, G. R.; MALUF, J. R. T.; HASS, J. C.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M. B. M. Mapeamento de risco de deficiência hídrica para soja no Rio Grande do Sul. In: CUNHA, G.R. **Lidando com riscos climáticos**: clima, sociedade e agricultura. Passo Fundo: Embrapa trigo, 2004. p. 245-272.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; SANTI, A.; FAGANELLO, A.; SATTLER, A. **Efeito da consorciação milho-braquiária (*Brachiaria brizantha*) na mitigação da compactação do solo**. Passo Fundo: Embrapa CNPT, 2008. 11 p. (Boletim de Pesquisa, 54).

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa- SPI, 2006. 412 p.

ESRI. ArcGis 9.3. Disponível em:
<<http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis10/index.html>>. Acesso em: 5 jan. 2010.

FLORES, C. A. **Descrição de perfil cultural de solos em Frederico Westphalen**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <mkcotta@yahoo.com.br> em 15 out. 2009. Trabalho realizado em campo como parte deste estudo.

FAO - Food Agriculture Organization. **A framework for land evaluation**. Rome, FAO; Wageningen, ILRI, 1976. 21 p. (Soils Bulletin, 32; ILRI Publication, 22)

FOODY, G. M. Status of land cover classification accuracy assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 185-201, 2002.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento dos Recursos Naturais**. Folha SH 22, Porto Alegre e parte das Folhas SH21 Uruguaiana e SI 22 Lagoa Mirim: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial das terras. Rio de Janeiro: IBGE, 1986. 796 p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 2006. SIDRA: Agricultura. 2006. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 15 jul. 2011.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agrícola Municipal (1990 - 2010). SIDRA: Agricultura. 2011. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 2 out. 2011.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>> . Acesso em: 6 fev. 2010.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Catálogo de Imagens. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/cdsr>>. Acesso em: 12 ago. 2011a.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. TOPODATA - Banco de dados Geomorfométricos do Brasil. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>>. Acesso em: 15 nov. 2011b.

LEPSCH, I. F.; BELLINAZZI JÚNIOR, R.; BERTOLINI, D.; ESPÍNDOLA, C. R. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983. 175 p.

MALUF, J. R. T. Nova classificação climática do estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 141-150, 2000.

MATZENAUER, R.; BARNI, N. A.; MACHADO, F. A.; ROSA, F. S. Análise agroclimática das disponibilidades hídricas para a cultura da soja na região do Planalto Médio. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 2, p. 263-275, 1998.

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MALUF, J. R. T.; BARNI, N. A.; BUENO, A. C.; DIDONE, I. A.; ANJOS, C. S.; MACHADO, F. A.; SAMPAIO, M. R. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Fepagro, 2002. 105 p. (Boletim FEPAGRO, 10).

MATZENAUER, R.; BARNI, N. A.; MALUF, J. R. T. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no estado do Rio Grande do Sul. **Ciencia Rural**, v. 33, n. 6, p. 1013-1019, 2003.

MELLO, R. W.; FONTANA, D. C; BERLATO, M. A. Indicadores de produção de soja no Rio Grande do Sul comparados ao zoneamento agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 12, p. 1167-1175, 2004.

MELLO, R. W. de; CARPENEDO, C. B.; MATZENAUER, R. Deficiência hídrica para a cultura da soja na região do Alto Jacuí, estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XV, Aracaju, 2007. **Anais**: Aracaju, 2007. CD-ROM.

MOTA, F.S.; BEIRSDORF, M. I. C.; COSTA, M. J. C. **Zoneamento agroclimático do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Pelotas: Ipeas, 1974. 122 p. (Circular, 50).

MOTA, F.S.; AGENDES, M. O. de; ALVES, E. G. P.; SIGNORINI, E. Análise agroclimática da necessidade de irrigação da soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, n.1, p.133-138, 1996.

PEREIRA, L. C. **Aptidão agrícola das terras e sensibilidade ambiental**: proposta metodológica. 122 p. Tese (Doutorado em Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável) –Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

PEREIRA, L. C.; DA SILVEIRA M. A.; LOMBARDI NETO, F. **Agroecologia e aptidão agrícola das terras**: as bases científicas para uma agricultura sustentável. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 11 p.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. Rio de Janeiro: Embrapa - CNPS, 1995. 65 p.

REIS, J. T.; MIORIN, V. M. F. Recursos naturais e uso da terra em áreas de produção familiar rural, médio alto Uruguai, RS. **Ciência e Natura**, v. 28, n. 2, p. 85-98, 2006.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCELTM para os cálculos de balanços hídricos:normal,sequencial,de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

SEMA. UFSM. Secretaria do Meio Ambiente; Universidade Federal de Santa Maria. Inventário florestal contínuo do Rio Grande do Sul, 2001. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/ifcrs>>. Acesso em: jul. 2009.

STRECK, A.V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHENEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: Emater/RS Ascar, 2008. 222 p.

ANEXO 1

CARACTERIZAÇÃO DE PERFIS DE SOLOS DE PASSO FUNDO E DE FREDERICO WESTPHALEN PARA AVALIAÇÃO DOS FATORES CONDICIONANTES DA APTIDÃO AGRÍCOLA DAS TERRAS (RAMALHO FILHO; BEEK, 1995).

1. Atributos do solo para determinação do fator condicionante *Fertilidade do solo*

PASSO FUNDO												
Tipo de solo	Horizonte	Prof. (cm)	T (mmol _c dm ⁻³)	V%	S (mmol _c dm ⁻³)	Al (%)	Al ³⁺ (mmol _c dm ⁻³)	H+Al (mmol _c dm ⁻³)	pH (água)	P (mg dm ⁻³)	C _{Org} (%)	Drenagem
LVd – LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico*	A11	0-30	105,0	16,0	17,0	56,0	22,0	88,0	4,8	4,0	1,3	Bem drenado
	A12	30-50	102,0	17,0	17,0	53,0	24,0	85,0	4,8	3,0	1,2	
	A3	50-70	97,0	15,0	15,0	62,0	25,0	82,0	4,8	2,0	1,1	
	B1	70-120	86,0	11,0	9,0	76,0	30,0	77,0	4,8	2,0	0,6	
	B21	120-180	75,0	9,0	7,0	79,0	27,0	68,0	4,6	2,0	0,6	
	B22	180-240	64,0	8,0	5,0	83,0	26,0	59,0	4,8	2,0	0,3	
NVdf – NITOSSOLO VERMELHO Distroférico típico*	A1	0-15	183,0	58,0	105,0	2,0	2,0	78,0	6,1	2,0	3,2	Bem drenado
	A3	15-45	140,0	43,0	61,0	13,0	11,0	80,0	5,2	1,0	1,1	
	B21	45-70	113,0	24,0	27,0	27,0	23,0	85,0	5,2	1,0	0,72	
	B22	70-160	98,0	18,0	180,0	30,0	25,0	81,0	5,3	1,0	0,47	
	B3	160-190	98,0	18,0	180,0	50,0	27,0	81,0	5,5	1,0	0,21	
NBa – NITOSSOLO BRUNO alumínico*	A11	0-25	95,0	38,0	3,6	41,0	25,0	59,0	4,8	2,0	1,1	Bem drenado
	A12	25-40	105,0	28,0	2,9	47,0	26,0	76,0	4,7	1,0	1,1	
	B21	40-65	122,0	15,0	1,8	81,0	76,0	104,0	4,6	<1,0	1,2	
	B22	65-85	131,0	11,0	1,5	85,0	84,0	116,0	4,6	<1,0	1,2	
	B3/C	85-130	125,0	10,0	1,1	87,0	86,0	114,0	4,6	<1,0	0,58	
	C	130-150+	104,0	9,0	0,9	91,0	87,0	95,0	4,8	<1,0	0,10	
LVaf – LATOSSOLO VERMELHO Aluminoférrico húmico*	A1	0-15	146	4,0	6,0	90,0	57,0	140,0	4,5	1,0	1,8	Bem drenado
	A3	15-60	128	3,0	5,0	91,0	51,0	123,0	4,6	1,0	1,2	
	B1	60-90	91	3,0	4,0	91,0	41,0	87,0	4,7	1,0	0,9	
	B21	90-150	90	3,0	3,0	86,0	31,0	87,0	4,9	1,0	0,67	
	B22	150-300+	75	6,0	5,0	92,0	59,0	70,0	5,5	1,0	0,35	

Continua...

FREDERICO WESTPHALEN

Tipo de solo	Hori- zonte	Prof. (cm)	T (mmol _c dm ⁻³)	V%	S (mmol _c dm ⁻³)	Al (%)	Al ³⁺ (mmol _c dm ⁻³)	H+Al (mmol _c dm ⁻³)	pH (água)	P (mg dm ⁻³)	C _{Org} (%)	Drena- gem
NVef – NITOSSOLO VERMELHO Eutroférico*	A1	0-15	15,6	50,0	79,0	3,0	3,0	77,0	5,4	4,0	1,9	Bem drenado
	A3	15-40	12,9	45,0	57,0	13,0	9,0	71,0	5,3	3,0	1,2	
	Bt1	40-65	11,7	48,0	66,0	16,0	9,0	61,0	5,2	2,0	0,8	
	B21t	65-95	10,4	43,0	44,0	12,0	6,0	59,0	5,0	2,0	0,6	
	B22t	95-130	10,0	43,0	43,0	25,0	15,0	56,0	5,3	2,0	0,4	
	B3t	130-170+	9,4	43,0	41,0	26,0	15,0	53,0	5,4	2,0	0,3	
LVdf – LATOSSOLO VERMELHO Distroférico**	Ap	0-13	126,9	69,4	88,0	0,0	0,0	38,9	5,8	5,4	1,3	Bem drenado
	BA	13-45	113,3	31,6	35,8	21,0	9,5	77,4	5,3	1,3	1,0	
	Bw1	45-110	115,7	15,8	18,3	4,7	14,8	97,4	5,0	1,8	0,8	
	Bw2	110-160	94,4	8,0	7,6	62,1	11,9	86,8	4,8	1,3	0,6	
CXve – CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutróficos**	Ap	0-13	182,7	86,6	158,2	0,0	0,0	24,6	5,5	9,4	1,6	Bem drenado
	AB	13-29	173,9	44,2	146,3	0,0	0,0	27,5	6,0	3,8	1,0	
	Bi	29-75	122,3	77,5	94,7	0,0	0,0	27,5	6,0	2,3	0,6	

T – Troca catiônica; V% – Saturação por base; S – Soma de bases trocáveis.

* Dados provenientes de Brasil (1973) e IBGE (1986).

** Dados da Pesquisa (coletados em campo).

2. Atributos do solo para determinação do fator condicionante *Deficiência de água e excesso de água*

PASSO FUNDO							
Tipo de solo	Textura	Tipo de argila	Teor de matéria orgânica	Profundidade efetiva	Drenagem	Deficiência de água	Excesso de água
LVd*	Argilosa	Tb***	Médio a baixo ($\pm 2,5\%$)	Muito profundo	Bem drenado	Nula	Nulo
NVdf*	Muito argilosa	Tb	Alto ($\pm 5\%$)	Muito profundo	Bem drenado	Nula/Ligeira	Nulo
NBa*	Muito argilosa	Tb	Alto ($\pm 5\%$)	Profundo	Bem drenado	Nula	Nulo
LVaf*	Muito argilosa	Tb	Médio (de 3-4%)	Muito profundo,	Bem drenado	Nula	Nulo
FREDERICO WESTPHALEN							
NVdf*	Muito Argilosa	Tb	Médio (3-4%)	Profundo	Bem Drenado	Ligeira/Moderada	Nulo
LVdf**	Muito Argilosa	Tb	Alto ($\pm 5\%$)	Muito Profundo	Bem Drenado	Nula	Nulo
CXve**	Argilosa	Ta****	Médio (3-4%)	Pouco Profundo	Bem Drenado	Nula/Ligeira	Lig./Mod.

* Dados provenientes de Brasil (1973) e IBGE (1986).

** Dados da Pesquisa (coletados em campo).

*** Argila de baixa atividade.

**** Argila de alta atividade.

3. Atributos do solo para determinação do fator condicionante *Suscetibilidade à erosão*

PASSO FUNDO					
Tipo de solo	Profundidade	Textura	Pedregosidade	Erosão	Relevo
LVd*	Muito profundo	Argilosa	Ausente	Moderada a forte	Suave ondulado
NVdf*	Muito profundo	Muito argilosa	Ausente	Moderada	Ondulado
NBa*	Profundo	Muito argilosa	Ausente	Moderada	Suave ondulado/Ondulado
LVaf*	Muito profundo	Muito argilosa	Ausente	Moderada a forte	Suave ondulado
FREDERICO WESTPHALEN					
NVdf*	Profundo	Muito argilosa	Ausente	Moderada	Suave ondulado
LVdf**	Profundo	Muito argilosa	Ausente	Moderada	Suave ondulado/Ondulado
CXve**	Pouco profundo	Argilosa	Muito pedregoso	Forte	Ondulado/Forte ondulado

* Dados provenientes de Brasil (1973) e IBGE (1986).

** Dados da Pesquisa (coletados em campo).

4. Atributos do solo para determinação do fator condicionante *Impedimento à mecanização*

PASSO FUNDO				
Tipos de solo	Relevo	Textura	Pedregosidade	Rochosidade
LVd*	Suave ondulado	Argilosa	Ausente	Ausente
NVdf*	Ondulado	Muito argilosa	Ausente	Ausente
NBa*	Ondulado	Argilosa	Ausente	Ausente
LVaf*	Suave ondulado	Muito argilosa	Ausente	Ausente
FREDERICO WESTPHALEN				
NVdf*	Suave ondulado	Muito argilosa	Ausente	Ausente
LVdf**	Suave ondulado/Ondulado	Muito argilosa	Ausente	Ausente
CXve**	Ondulado/Forte ondulado	Argilosa	Muito pedregoso	Ausente

* Dados provenientes de Brasil (1973) e IBGE (1986).

** Dados da Pesquisa (coletados em campo).

ANEXO 2

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS SOLOS CULTIVADOS COM SOJA EM SISTEMA DE ROTAÇÃO EM PASSO FUNDO E EM FREDERICO WESTPHALEN (RS) - Dados da pesquisa

1. Análises físicas

a) Granulometria

Profundidade (cm)	Passo Fundo			Frederico Westphalen					
	LVd (g kg ⁻¹)			LVdf (g kg ⁻¹)			CXve (g kg ⁻¹)		
	Areia	Argila	Silte	Areia	Argila	Silte	Areia	Argila	Silte
0-5	222,38	495,58	282,04	71,50	547,50	381,00	210,13	391,56	398,31
5-10	220,33	527,60	252,06	64,50	590,25	345,25	168,38	439,38	392,25
10-20	221,25	525,98	252,77	60,63	586,31	353,06	187,17	442,17	370,67
20-30	190,67	564,71	244,62	61,00	614,69	324,31	191,67	443,33	365,00
Média 0-30	213,66	528,47	257,87	64,41	584,69	350,91	189,33	429,11	381,56

LVd – LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico; LVdf – LATOSSOLO VERMELHO distroférico HÚMICO; CXve – CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico.

Fonte: Dados da pesquisa (os valores representam médias de quatro repetições, sendo provenientes de amostras coletadas em mini trincheiras na área de estudo).

b) Densidade

Profundidade (cm)	Densidade do solo (kg dm ³)		
	Passo Fundo	Frederico Westphalen	
	LVd	LVdf	CXve
0-5	1,10	1,28	1,26
5-10	1,43	1,40	1,41
10 - 20	1,42	1,32	1,33
20 - 30	1,42	1,27	1,25
Média 0-30	1,34	1,32	1,31

LVd – LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico; LVdf – LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico; CXve – CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico.

Fonte: Dados da pesquisa (os valores representam médias de quatro repetições, sendo provenientes de amostras coletadas em anéis volumétricos em mini trincheiras na área da pesquisa).

2. Análises químicas

a) Área experimental da Embrapa Trigo

LATOSSOLO VERMELHO - LVd								
Prof. (cm)	T (mmol _c dm ⁻³)	V (%)	S (mmol _c dm ⁻³)	Al (%)	Al ³⁺ (mmol _c dm ⁻³)	H+Al (mmol _c dm ⁻³)	pH (água)	P (mg dm ⁻³)
0-5	155,08	47,01	73,05	9,03	6,90	82,05	5,15	67,60
5-10	140,42	49,18	68,54	11,14	8,27	71,83	5,35	30,50
10-20	133,48	52,53	70,63	8,83	6,56	62,93	5,48	14,14
20-30	127,53	50,33	63,87	12,53	8,78	63,89	5,44	7,55
0-30	139,13	49,76	69,02	10,38	7,63	70,17	5,36	29,95

LVd – LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico.

Fonte: Dados da pesquisa (os valores representam médias de quatro repetições, sendo provenientes de amostras coletadas em mini trincheiras na área de estudo).

b) Áreas comerciais de grãos em Frederico Westphalen

LATOSSOLO VERMELHO - LVdf								
Prof. (cm)	T (mmol _c dm ⁻³)	V (%)	S (mmol _c dm ⁻³)	Al (%)	Al ³⁺ (mmol _c dm ⁻³)	H+Al (mmol _c dm ⁻³)	pH (água)	P (mg dm ⁻³)
0-5	141,98	72,63	103,80	0,70	0,50	38,18	6,13	12,55
5-10	105,90	64,10	67,95	2,88	1,75	37,95	5,87	6,75
10-20	104,73	64,40	67,95	2,85	1,50	36,78	5,75	5,97
20-30	97,73	60,45	59,35	3,08	1,63	38,55	5,60	5,83
0-30	112,58	65,39	74,76	2,38	1,34	37,86	5,84	7,77

LVdf – LATOSSOLO VERMELHO distroférrico

Fonte: Dados da pesquisa (os valores representam médias de quatro repetições, sendo provenientes de amostras coletadas em mini trincheiras na área de estudo).

CABISSOLO HÁPLICO - CXve								
Prof. (cm)	T (mmol _c dm ⁻³)	V (%)	S (mmol _c dm ⁻³)	Al (%)	Al ³⁺ (mmol _c dm ⁻³)	H+Al (mmol _c dm ⁻³)	pH (água)	P (mg dm ⁻³)
0-5	196,70	82,28	166,60	0,25	0,25	30,08	6,18	16,80
5-10	179,93	78,60	146,48	0,63	0,63	33,45	5,95	11,77
10-20	133,63	74,50	99,53	1,10	1,33	34,13	5,83	4,47
20-30	137,60	68,00	96,47	6,27	2,17	41,13	5,53	3,47
0-30	161,96	75,84	127,27	2,06	1,09	34,70	5,87	9,13

CXve – CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico

Fonte: Dados da pesquisa (os valores representam médias de quatro repetições, sendo provenientes de amostras coletadas em mini trincheiras na área de estudo).

ANEXO 3

CRITÉRIOS UTILIZADOS PARA DEFINIÇÃO DOS GRAUS DE LIMITAÇÃO DOS FATORES CONDICIONANTES DA CONDIÇÃO AGRÍCOLA DAS TERRAS

1. Graus de limitação por deficiência de fertilidade

Graus de limitação	CTC ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	V (%)	S ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	Al trocável ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	P (mg kg^{-1})
Nulo	≥ 8	≥ 50	≥ 4	$< 0,3$	≥ 30
Ligeiro/Moderado	$\geq 6 \text{ e } < 8$	$\geq 35 \text{ e } < 50$	$\geq 2 \text{ e } < 4$	$\geq 0,3 \text{ e } < 0,4$	$\geq 10 \text{ e } < 30$
Forte	$\geq 4 \text{ e } < 6$	$\geq 10 \text{ e } < 35$	< 2	$\geq 0,4 \text{ e } < 1$	< 10
Muito Forte	< 4	< 10	< 2	$\geq 1 \text{ e } < 4$	< 10

Fonte: Comissão de Fertilidade do Solo RS e SC (1995).

2. Graus de limitação por deficiência de água

Graus de limitação	Número de meses com deficiência hídrica
Nulo	< 1
Nulo/Ligeiro	1 a 2
Ligeiro	3 a 5
Moderado	4 a 6
Forte	7 a 9
Muito Forte	> 9

Fonte: Ramalho Filho e Beek (1995).

% Silte + % Argila	Grupamentos texturais do solo*		
	Textura arenosa	Textura média e textura argilosa	Textura muito argilosa
Graus de limitação**			
< 5	MF	-	-
5-10	F	-	-
10-15	M	-	-
15-25	L	-	-
25-30	N	-	-
30-60	-	N	-
60-75	-	N	N
75-85	-	L	L
85-90	-	M	M
90-95	-	F	F
> 95	-	MF	MF

* Grupamentos texturais; profundidade = 100 cm.

** Graus de limitação: N = Nulo; L = Ligeiro; M = Moderado; F = Forte; MF = Muito Forte.

Fonte: Pereira (2002).

3. Graus de limitação por excesso de água ou deficiência de oxigênio

Grau de limitação	Classe de drenagem	Aeração
Nulo	Excessivamente e Bem Drenado	Boa
Ligeiro	Moderadamente drenado	Pouca deficiência
Moderado	Imperfeitamente drenado	Deficiente
Forte	Mal drenado	Alta deficiência
Muito Forte	Muito mal drenado	Alta deficiência

Fonte: Ramalho Filho e Beek (1995).

4. Graus de limitação por suscetibilidade à erosão

a) Declividade

Grau de limitação	Nível de declive	Relevo
Nulo	0 a 3%	Plano
Ligeiro a moderado	3 a 8%	Suave ondulado
Moderado a forte	8 a 20 %	Ondulado
Muito forte	20 a 45%	Fortemente ondulado
Extremamente forte	Acima de 45%	Montanhoso

Fonte: Ramalho Filho e Beek (1995).

b) Profundidade

Grau de limitação	Profundidade efetiva do solo	
	Classe	Profundidade (cm)
Nulo	Profundo	> 200
Ligeiro	Profundo	100 a 200
Moderado	Moderadamente Profundo	50 a 100
Forte	Raso	25 a 50
Muito Forte	Muito raso	< 25

Fonte: Lepsch et al. (1991); Pereira (2002).

5. Graus de limitação por impedimento à mecanização

a) Graus de limitação referentes à declividade, pedregosidade, rochoso e rendimento do trator

Grau de limitação	Declividade	Pedras (%)	Rochas (%)	Rendimento do trator (%)
Nulo	0 a 3%	Sem fragmentos	< 2	> 90
Ligeiro	3 a 8%	< 15	2 a 15	75 a 90
Moderado	8 a 20 %	15 a 50	15 a 50	50 a 75
Forte	20 a 45%	> 50	50 a 90	< 50
Muito Forte	Acima de 45%	> 50	> 90	Não permite o uso

Fonte: Ramalho Filho e Beek (1995); Lepsch et al. (1991).

b) Graus de limitação referentes à interação (declividade x presença de pedras e/ou rochas)

Declividade		Relevo	Rochas e/ou Pedras				
			Nulo	Ligeiro	Moderado	Forte	Muito Forte
Classe	(%)	Tipo	Grau de limitação*				
A	0-3	Plano	N	L	F	MF	MF
B	3-8	Suave ondulado	L	M	MF	MF	MF
C	8-13	Mod.ondulado	M	F	MF	MF	MF
D	13-20	Ondulado	F	MF	MF	MF	MF
E	20-45	Forte ondulado	MF	MF	MF	MF	MF
F	>45	Montanhoso e escarpado	MF	MF	MF	MF	MF

* N = Nulo; L = Ligeiro; M = Moderado; F = Forte; MF = Muito Forte.

Fonte: Giboshi (1999 apud PEREIRA, 2002); Ramalho Filho e Beek (1995).

CAPÍTULO 2

ESTIMATIVA DO ESTOQUE DE CARBONO EM ÁREA EXPERIMENTAL E EM ÁREA DE PRODUÇÃO COMERCIAL DE GRÃOS NO RIO GRANDE DO SUL

1. INTRODUÇÃO

O uso da terra e a mudança do uso da terra, incluindo agricultura, florestas e pastagens, afetam diretamente as trocas de gases de efeito estufa entre os reservatórios de carbono terrestres e a atmosfera (IPCC, 2001; 2006).

O solo e a vegetação são considerados reservatórios de carbono terrestres e são classificados, respectivamente, como o terceiro e o quarto maiores reservatórios, dentre os cinco principais, que são oceano, rochas, solo, vegetação e atmosfera (LAL, 2004). O sequestro de carbono por esses reservatórios envolve a captura do CO₂ atmosférico pelo processo de fotossíntese e seu armazenamento em forma de carbono na vegetação, no solo e nos oceanos (IPCC, 2006). O solo, considerado à profundidade de um metro, apresenta, em média, 4,1 vezes mais carbono que a vegetação e 3,0 vezes mais do que a atmosfera (LAL, 2004). Sendo assim, a preservação deste reservatório é de grande importância para o equilíbrio da concentração do gás carbônico na atmosfera.

O plantio de florestas, a agricultura conservacionista e as técnicas de manejo e conservação de solos, incluindo o sistema plantio direto, são alternativas que propiciam o acúmulo de carbono no compartimento terrestre. De maneira oposta, as perdas de carbono nesses reservatórios são agravadas pelo desmatamento, pelas queimadas e por práticas agrícolas não conservacionistas (LAL, 2004; SISTI et al., 2004). Um sistema agrícola pode atuar tanto como dreno quanto como fonte de CO₂ para a atmosfera. Para que funcione como dreno é necessário que as adições de carbono no solo superem as perdas por oxidação e erosão. Neste sentido, Bayer e Dieckow (2005) ressaltam que os sistemas de manejo agrícola que incorporam aporte elevado de resíduos vegetais no solo intensificam os fluxos de matéria e energia, facilitando, assim a interação entre os componentes minerais e orgânicos, com reflexos no acúmulo de matéria orgânica.

Tendo em vista que a matéria orgânica é um dos principais contribuintes para a fertilidade dos solos nas condições brasileiras, o sistema plantio direto é tido como uma alternativa para a sustentabilidade da produção agrícola. Segundo De Maria (1999), o plantio direto pode representar uma redução de 75% de perda de solo e 25% de perda de água por escorrimento, o que, em outras palavras, significa uma redução drástica das perdas de matéria orgânica dos solos em comparação aos sistemas de manejo convencionais.

Segundo a Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha, a área manejada com plantio direto no Brasil evoluiu de cerca de 1 milhão de hectares no início na década de 90, para 25,5 milhões em 2005/06 (FEBRAPDF, 2011). No Rio Grande do Sul, o sistema plantio direto está presente em 90% da produção agrícola, contudo o monocultivo da soja predomina no verão e 75% da área de inverno é mantida sob pousio, com vegetação espontânea que não produz matéria orgânica suficiente para atender à demanda do solo (DENARDIN, 2011). Estudos sobre o conteúdo de matéria orgânica em áreas sob diferentes sistemas de preparo do solo e diferentes rotações de culturas têm evidenciado resultados positivos do sistema plantio direto quando as rotações de culturas incluem o cultivo de plantas de cobertura, particularmente, de gramíneas e leguminosas, como adubo verde (AITA; GIACOMINI, 2006; BAYER et al., 2000).

O sistema plantio direto é uma das ações estimuladas pelo governo federal no programa Agricultura de Baixo Carbono (ABC), para se cumprir as metas voluntárias de redução de emissões denominadas NAMAS (*National Appropriated Mitigation Actions*), assumidas pelo país na 15ª Conferência das Partes (COP 15), em Copenhague, em 2009. Até o ano de 2020 está prevista a implantação de práticas de ABC em 8 milhões de hectares com redução de 16 a 20 milhões de tonCO₂ equivalente. O programa destina cerca de 2 bilhões de reais para práticas agrônômicas que permitem compatibilizar aumento da produção e proteção ao meio ambiente.

Estudos que comprovam a capacidade do sistema plantio direto em estocar carbono ainda são escassos no Brasil, destacando-se os trabalhos de Bernoux et al. (2006), Sá et al. (2009) e Sisti et al. (2004). A diversidade das condições edafoclimáticas das diferentes regiões brasileiras torna limitada a representatividade das taxas de carbono, tanto da vegetação quanto no solo, para as diferentes regiões. Sendo assim, conhecer a capacidade de estocagem de carbono nos diferentes compartimentos dos sistemas agrícolas é estratégico para a adoção de

alternativas de mitigação das emissões de gases de efeito estufa e redução do aquecimento global.

Deste modo, o objetivo deste estudo foi estimar o estoque de carbono em sistemas de produção de grãos manejados sob sistema plantio direto, em área experimental e em áreas de produção comercial nos municípios de Passo Fundo e de Frederico Westphalen, no Rio Grande do Sul.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A quantificação da biomassa e do estoque de carbono foi realizada em três áreas de cultivo de grãos, manejadas sob sistema plantio direto no estado do Rio Grande do Sul, estando uma delas localizada no município de Passo Fundo e as outras duas em Frederico Westphalen. As características dos municípios onde estão localizadas essas áreas, quanto à localização, clima e tipo de solo predominante encontram-se descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização dos municípios onde estão localizadas as áreas de estudo

Característica	Passo Fundo	Frederico Westphalen*
Coordenadas Geográficas	28°15'39" S 52°24'33" W	27°21'33" S 53°23'40" W
Altitude	687 m	566 m
Temperatura anual média	17,5°C	18,8°C
Precipitação anual média	1.787 mm	1.819 mm
Tipo de Clima**	Subtropical úmido	Subtropical úmido
Tipo de solo***	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico	LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico e CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico

* Os dados climáticos de Frederico Westphalen são referentes ao Município de Iraí, RS.

** Classificação de Köppen

*** Solos predominantes nas áreas de estudo. Classificação de acordo com Embrapa (2006).

A área localizada em Passo Fundo pertence à Estação Experimental da Embrapa Trigo e engloba dois ensaios experimentais de longa duração implantados em LATOSSOLOS VERMELHOS, sob sistema de plantio direto há mais de 20 anos, onde vem sendo avaliados os efeitos de sucessão e de rotação de culturas. Um dos ensaios é formado pela sucessão trigo (*triticum aestivum*) no inverno e soja (*Glycine max* (L.) Merr.) no verão, denominado sucessão trigo/soja. O outro pela rotação de culturas onde o trigo, a aveia branca (*Avena sativa*) e a ervilhaca (*Vicia sativa*) são cultivados no inverno e a soja e o sorgo (*Sorghum bicolor*) no verão. Este sistema é denominado rotação trigo/soja – ervilhaca/soja - aveia branca/sorgo. Ressalta-se que até safra de 2007 o milho (*Zea may*) fazia parte deste sistema de rotação. Entretanto, o milho foi substituído pelo sorgo devido à ocorrência de furtos das espigas nesta área, o que ocasionou interferências nas análises experimentais realizadas pela Embrapa.

O preparo da área, as aplicações de adubos e corretivos são realizadas pela Embrapa Trigo, com base nos resultados da análise química do solo e nas recomendações técnicas para cada cultura no Rio Grande do Sul.

As coletas de dados das culturas agrícolas e do solo para este estudo corresponderam às safras de verão e de inverno de 2008/2009. As cultivares utilizadas foram: soja BRS 243 RR; sorgo BR 304; trigo BRS Guamirim; aveia branca de variedade guapa; e ervilhaca comum. No ensaio referente à rotação trigo/soja – ervilhaca/soja – aveia branca/sorgo, as três culturas de inverno e as duas de verão são plantadas anualmente, em diferentes parcelas, de modo a simular um sistema de rotação de três anos em um único ano. Os sistemas de sucessão e rotação de culturas encontram-se implantados em parcelas experimentais de 130 m², com quatro repetições (Figura 1).

A coleta das amostras da biomassa da parte aérea das plantas de soja, trigo, aveia branca, ervilhaca e sorgo e de amostras de liter foi realizada em três pontos aleatórios dentro de cada parcela. As amostras de biomassa radicular e de solos, em somente um ponto.



Figura 1 – Vista das parcelas cultivadas com soja em área experimental da Embrapa Trigo.

As áreas de estudo localizadas em Frederico Westphalen consistem de duas lavouras comerciais de grãos pertencentes a um produtor rural e encontram-se situadas sobre LATOSSOLO VERMELHO e CAMBISSOLO HÁPLICO, que são os tipos de solos predominantes naquele município.

O sistema de rotação de culturas adotado em ambas as áreas é o trigo/soja - trigo/soja - trigo/milho (Figuras 2 e 3). A lavoura implantada na área de LATOSSOLO VERMELHO vem sendo manejada sob sistema plantio direto há oito anos, sendo que o uso anterior desta

área era feito, ocasionalmente, com lavoura de milho. Já, a área de CAMBISSOLO HÁPLICO vem sendo manejada sob sistema plantio direto há quatro anos e, anteriormente, era uma área abandonada com crescimento de vegetação espontânea, onde havia dominância do capim “rabo-de-burro” (*Andropogon* sp.). O preparo da área, as aplicações de adubos e corretivos são realizadas pelo produtor de acordo com as recomendações técnicas para cada cultura, no Rio Grande do Sul.

As coletas dos dados referentes às culturas de soja, milho e trigo corresponderam às safras de verão e de inverno do ano de 2008/2009. As variedades plantadas foram a soja BRS 243 RR, o trigo Pampeano e o milho Agroceres 9020. De acordo com o sistema de rotação adotado, quando foram coletados os dados deste estudo, o plantio do milho havia sido feito há dois anos na área de LATOSSOLO e, no ano anterior, na área de CAMBISSOLO. Desta forma, para efeito de simulação do sistema de rotação de três anos, procedeu-se à coleta da biomassa do milho em outra área de LATOSSOLO e de CAMBISSOLO, contíguas àquelas onde foram coletados os materiais vegetais da soja e do trigo. Além disso, para os anos 1 e 2 da rotação, onde são cultivados trigo no inverno e soja no verão, foram considerados um mesmo valor de biomassa seca da vegetação, do liter e do solo.

Para coleta das amostras de biomassa das culturas, do liter e do solo, foram demarcadas aleatoriamente quatro parcelas de 130 m² na área total de cada lavoura, conforme parcelas da área experimental em Passo Fundo. A biomassa aérea de plantas de soja, trigo e milho e as amostras de liter foram coletadas em três pontos aleatórios dentro de cada parcela. As amostras de biomassa radicular e de solos em um único ponto.



Figura 2 – Vista da lavoura comercial de soja em Frederico Westphalen, RS.



Figura 3 – Vista da lavoura comercial de trigo em Frederico Westphalen, RS.

2.2 Estimativa do estoque de carbono na vegetação e no liter

A estimativa do estoque de carbono na vegetação foi realizada a partir da quantificação da biomassa seca acima (parte aérea) e abaixo do solo (raízes), utilizando-se o método direto e destrutivo de quantificação de biomassa (AREVALO et al., 2002; IPCC, 2003).

Em cada parcela de 130 m² foi coletado um metro linear de plantas de soja, trigo, aveia e sorgo, em três linhas de cultivo selecionadas aleatoriamente, totalizando três metros lineares de material vegetal por parcela (Figura 4). A coleta do material vegetal foi realizada na fase de máxima produção de biomassa. No caso da soja, procedeu-se à coleta na fase de início de enchimento das vagens, e do sorgo, no início da fase de maturação fisiológica dos grãos. Os grãos de sorgo não foram contabilizados na massa seca da panícula, por terem sofrido ataque por pássaros. O trigo e a aveia foram coletados quando as plantas apresentavam estágio de grãos no estado leitoso. Em cada parcela cultivada com ervilhaca, foi coletado 0,25m² de plantas na fase de início da formação das sementes em três pontos da parcela. No caso do milho, coletou-se 0,6 metros lineares em três pontos de cada parcela, os quais continham, em média, três plantas, na fase de estágio de grão leitoso.

As plantas de soja, trigo, aveia, sorgo, milho e ervilhaca foram cortadas rentes ao solo e seus compartimentos foram separados em folhas, colmo/hastes, vagens/grãos, espigas, panículas e pendão, de acordo com a estrutura de cada uma. O sistema radicular das plantas foi coletado em uma das linhas (uma amostra por parcela) onde havia sido coletada a parte aérea, por meio da inserção de uma caixa de ferro, com dimensões de 35 x 25 x 12 cm, no perfil do solo (Figura 5). Após a retirada desta caixa, as raízes foram separadas do solo a seco, com o auxílio de uma peneira, e pesadas frescas.

Todo o material coletado em cada parcela (folhas, hastes/colmos, vagens, espigas, panícula, pendão e raízes) foi pesado fresco e colocado para secar em estufa de circulação forçada de ar a 60°C até estabilização do peso. De posse da massa seca de cada compartimento das plantas, o estoque de carbono foi estimado considerando-se que 45% da biomassa seca seja carbono (AITA; GIACOMINI, 2006; SISTI et al., 2004). Em seguida, os valores de biomassa seca e de carbono amostrados foram extrapolados para Mg ha⁻¹.



Figura 4 – Exemplo de metro linear de plantas de soja selecionada para coleta da biomassa.



Figura 5 – Retirada das raízes com auxílio de uma caixa de ferro.

O estoque de carbono no liter foi estimado utilizando o método direto de quantificação de biomassa, da mesma forma feita para a vegetação (AREVALO et al., 2002; IPCC, 2003). A camada de liter depositada sobre o solo em cada parcela foi coletada utilizando-se um gabarito quadrado de área interna de $0,25\text{m}^2$, disposto aleatoriamente no local onde foram coletadas as plantas (Figura 6). O estoque de carbono foi estimado considerando-se que 45% da biomassa seca do liter seja constituída de carbono (AITA; GIACOMINI, 2006; SISTI et al., 2004).



Figura 6 – Vista do gabarito quadrado para coleta de liter.

O delineamento experimental adotado para análise do estoque de carbono na vegetação e no liter foi o inteiramente casualizado com quatro repetições. A análise de variância e os testes de média dos sistemas de sucessão e de rotação de culturas em Passo Fundo, assim como das áreas de LATOSSOLO VERMELHO e CAMBISSOLO HÁPLICO

em Frederico Westphalen foram avaliadas empregando o Teste de Tukey com 5% de probabilidade, utilizando o programa ASSISTAT (SILVA; AZEVEDO, 2011).

2.3 Estimativa do estoque de carbono no solo

Em cada trincheira onde foram retiradas as raízes das plantas, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo nas profundidades de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm, com quatro repetições para cada profundidade, totalizando 16 amostras para cada cultura componente do sistema de sucessão e rotação. As amostras deformadas foram utilizadas para análise da fertilidade e determinação granulométrica do solo. A análise granulométrica foi feita empregando-se o método da pipeta (CAMARGO et al., 1986), sendo a dispersão mecânica das amostras efetuada com agitação lenta utilizando mesa agitadora reciprocante. Já, as amostras indeformadas, coletadas em anéis do tipo Kőepeck de 2,5 cm de altura e 5,7 cm de diâmetro, foram utilizadas para determinação da densidade do solo, conforme o método descrito em Embrapa (1997), e contabilização do carbono total. A profundidade de 30 cm do solo foi definida com base na profundidade de trabalho dos implementos de preparo do solo, e está de acordo com o preconizado pelo IPCC (2003), como recomendada para contabilização do carbono no solo.

Para quantificação do estoque de carbono orgânico no solo foi utilizando o método denominado massa de carbono por unidade de área (IPCC, 2003), também utilizado por Bayer et al. (2000) e Sisti et al. (2004). Este método consiste em multiplicar a espessura da camada de solo analisada (P) pela densidade do solo (D) e pela concentração de carbono orgânico (C_{org}) na camada, conforme a Equação 01.

$$C_{orgS} = \sum ([C_{org}] * D * P * 10) \text{ MgC ha}^{-1} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde: C_{orgS} = estoque total de carbono orgânico no solo na profundidade total analisada (Mg C ha^{-1}); $[C_{org}]$ = concentração de carbono numa dada massa de solo (g C kg^{-1} solo); D = densidade do solo (Mg m^{-3}); P = profundidade da camada de solo analisada (m).

A determinação da concentração de carbono orgânico ([C]) em cada profundidade de solo foi realizada empregando o método Walkley-Black descrito em Embrapa (1997).

O delineamento experimental utilizado para avaliar o estoque de carbono no solo foi o de parcelas subdivididas. No caso da área experimental localizada em Passo Fundo, os sistemas de sucessão e rotação de culturas foram considerados como tratamentos, e as safras de verão e de inverno como subtratamentos. Já nas áreas localizadas em Frederico Westhalen, os tratamentos foram os dois tipos de solos (Latosolo e Cambissolo) e os subtratamentos, as safras de verão e de inverno. A análise de variância e as diferenças entre médias foram analisadas empregando o Teste de Tukey com 5% de probabilidade utilizando o programa ASSISTAT (SILVA; AZEVEDO, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estoque de biomassa seca e de carbono na vegetação e no liter

Área experimental da Embrapa Trigo em Passo Fundo

Os valores médios de biomassa seca e de estoque de carbono no liter e nos diferentes compartimentos das plantas que fazem parte dos sistemas de sucessão e de rotação de culturas implantados na área experimental da Embrapa Trigo constam, respectivamente, das Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Biomassa seca e estoque de carbono nas culturas e no liter do sistema de sucessão trigo/soja implantado na área experimental da Embrapa Trigo em Passo Fundo, RS

Compartimento	Sucessão Trigo/Soja					
	Trigo		Soja		Total anual	
	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)
Espiga/Vagem	1,83	0,83	1,56	0,70	3,39	1,53
Folha	1,58	0,71	1,64	0,74	3,22	1,45
Colmo/Haste	2,87	1,29	3,84	1,73	6,71	3,02
Raiz	2,91	1,31	2,53	1,14	5,44	2,45
Total da vegetação	9,19	4,14	9,57	4,31	18,76	8,45
Liter	2,21	0,99	5,39	2,42	7,60	3,41

O estoque médio anual de carbono na sucessão trigo/soja foi de 8,45 MgC ha⁻¹ na vegetação e 3,41 MgC ha⁻¹ no liter. O carbono estocado na biomassa seca do trigo correspondeu a 4,14 MgC ha⁻¹ e da soja 4,31 MgC ha⁻¹. A distribuição desse estoque nos compartimentos da planta de trigo foi 32%, 31%, 20% e 17% nos compartimentos raiz, colmo, folha e espiga, respectivamente. No caso da soja, as hastes concentraram 41% do carbono, seguidas pelas raízes (26%), folhas (17%) e vagens (16%). O estoque médio de carbono no liter contabilizado nas parcelas cultivadas com soja foi mais que o dobro daquele quantificado nas parcelas cultivadas com trigo, conforme Tabela 2. Essa diferença, provavelmente, está relacionada com a velocidade de decomposição dos resíduos das culturas, tendo em vista que as gramíneas apresentam uma taxa de decomposição mais lenta que as leguminosas, permanecendo, assim, por mais tempo sobre o solo.

No sistema de rotação de culturas trigo/soja – ervilhaca/soja – aveia branca/sorgo, as culturas do sorgo e da aveia branca foram as que apresentaram produções maiores de biomassa seca (Tabela 3), fazendo com que o terceiro ano da rotação contribuísse em maior proporção para o estoque de carbono total por hectare, comparativamente ao primeiro e segundo anos.

Tabela 3 – Biomassa seca e estoque de carbono nos compartimentos das plantas componentes do sistema de rotação de culturas Trigo/Soja – Ervilhaca/Soja – Aveia Branca/Sorgo e no liter na área experimental da Embrapa Trigo em Passo Fundo, RS

Primeiro ano da rotação (ano 1) – Trigo/Soja						
Compartimento	Trigo		Soja		Total anual	
	Biomassa	Carbono	Biomassa	Carbono	Biomassa	Carbono
	(Mg ha ⁻¹)		(Mg ha ⁻¹)		(Mg ha ⁻¹)	
Espiga/Vagem	2,36	1,06	1,37	0,62	3,73	1,68
Folha	1,84	0,83	1,46	0,66	3,30	1,49
Colmo/Haste	3,82	1,72	2,99	1,35	6,81	3,07
Raiz	2,97	1,34	1,68	0,75	4,65	2,09
Total da vegetação	11,00	4,95	7,49	3,38	18,49	8,33
Liter	3,45	1,55	4,82	2,17	8,27	3,72
Segundo ano da rotação (ano 2) – Ervilhaca/Soja						
Compartimento	Ervilhaca		Soja		Total anual	
	Biomassa	Carbono	Biomassa	Carbono	Biomassa	Carbono
	(Mg ha ⁻¹)		(Mg ha ⁻¹)		(Mg ha ⁻¹)	
Vagem	-	-	1,52	0,68	1,52	0,68
Folha	2,63	1,18	1,55	0,70	4,18	1,88
Colmo/Haste	1,82	0,82	3,53	1,59	5,35	2,41
Raiz	4,24	1,91	1,84	0,83	6,08	2,74
Total da vegetação	8,69	3,91	8,45	3,80	17,14	7,71
Liter	2,53	1,14	7,65	3,44	10,18	4,58
Terceiro ano da rotação (ano 3) – Aveia Branca/Sorgo						
Compartimento	Aveia Branca		Sorgo		Total anual	
	Biomassa	Carbono	Biomassa	Carbono	Biomassa	Carbono
	(Mg ha ⁻¹)		(Mg ha ⁻¹)		(Mg ha ⁻¹)	
Panícula	2,85	1,28	1,54	0,69	4,39	1,97
Folha	1,69	0,76	3,90	1,75	5,59	2,51
Colmo/Haste	3,83	1,72	4,54	2,04	8,37	3,76
Raiz	4,32	1,94	3,96	1,78	8,28	3,72
Total da vegetação	12,68	5,71	13,94	6,27	26,62	11,98
Liter	3,80	1,71	3,98	1,79	7,78	3,50

Diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade foram encontradas no estoque de carbono total da soja e do trigo entre os sistema de sucessão e os anos 1 e 2 da rotação (Tabela 4). O carbono total estocado na soja em sucessão diferiu significativamente daquele estocado na soja plantada no primeiro ano da rotação (soja antecedida pelo trigo) e também na soja cultivada no ano 2 (soja antecedida pela ervilhaca). O estoque na soja em sucessão foi aproximadamente 28% superior ao estoque encontrado no ano 1 da rotação e 14% a mais do quantificado no ano 2. A diferença significativa entre as médias foi devida, particularmente, ao compartimento haste e colmo das plantas de soja e de trigo, respectivamente (Tabela 4).

O valor médio de biomassa seca total da soja nos sistemas de sucessão e no primeiro e segundo anos do sistema de rotação, de 8,50 Mg ha⁻¹ (média dos valores 9,57, 7,49 e 8,45 constantes nas tabelas 2 e 3) são concordantes com valores relatados por Longhi et al. (2007), de 10,4 MgC ha⁻¹ e por Martorano (2007), de 7 Mg ha⁻¹ em tratamentos não irrigados e de 14 MgC ha⁻¹ em tratamentos irrigados. A distribuição do carbono nos compartimentos da planta de soja não diferiu entre os sistemas sucessão e rotação de culturas, seguindo a sequência decrescente: haste, raiz, folha e vagem.

Tabela 4 – Estoque de carbono nas plantas de soja e de trigo sob os tratamentos sucessão e anos 1 e 2 da rotação de culturas na área experimental da Embrapa Trigo em Passo Fundo, RS

Compartimento	Estoque de C nas plantas de soja (Mg C ha ⁻¹)				Estoque de C nas plantas de trigo (Mg C ha ⁻¹)	
	Sucessão	Rot. ano 1	Sucessão	Rot. ano 2	Sucessão	Rot. ano 3
Vagem/Espiga	0,70 a	0,62 a	0,70 a	0,68 a	0,83 b	1,06 a
Folha	0,74 a	0,66 a	0,74 a	0,70 a	0,71 a	0,83 a
Haste/Colmo	1,73 a	1,35 b	1,73 a	1,59 b	1,29 b	1,72 a
Raiz	1,14 a	0,75 a	1,14 a	0,83 a	1,31 a	1,34 a
Total na vegetação	4,31 a	3,38 b	4,31 a	3,80 b	4,14 b	4,95 a
Liter	2,42 a	2,17 a	2,42 b	3,44 a	0,99 a	1,55 a

Médias seguidas pela mesma letra, em linha, para cada compartimento, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Com relação ao trigo, o estoque de carbono total na planta cultivada no primeiro ano da rotação foi cerca de 17% superior ao do trigo cultivado no sistema de sucessão, diferindo estatisticamente entre os tratamentos sucessão e rotação (Tabela 4). A maior quantidade de carbono nos compartimentos do trigo no sistema de rotação comparativamente à sucessão (Tabela 4) pode ser atribuída à diversificação de culturas no sistema de rotação, o qual inclui as culturas de ervilhaca e aveia branca. Segundo Derpsch e Calegari (1992) a aveia caracteriza-se pela elevada capacidade de produção de fitomassa, além de apresentar resistência satisfatória à ferrugem, ao ataque de pulgões e à deficiência hídrica. Ela tem sido incluída em sistemas de rotação visando a eliminação de patógenos, e tem apresentado ótimos resultados sobre a produtividade de culturas como soja e feijão. Quanto à ervilhaca, um dos benefícios é a capacidade de fixação do N₂ atmosférico, o que contribui para a melhoria do balanço de nitrogênio no solo (AITA; GIACOMINI, 2006).

Os estoques de biomassa seca do trigo quantificados nos sistemas de sucessão e rotação de culturas de, respectivamente, 9,20 e 11,00 Mg ha⁻¹ (Tabelas 2 e 3), condizem com aqueles encontrados por Agostinetto et al. (2000) que foi de 9,10 Mg ha⁻¹ num sistema de rotação de culturas manejado sob plantio convencional em área de Podzólico Vermelho no Rio Grande do Sul. Neste trabalho, os autores mencionam a cultura do trigo como sendo uma das que apresenta maior capacidade de cobertura de solo em menor período de tempo, contribuindo assim para o controle da erosão. As plantas de trigo apresentaram maior quantidade de carbono no compartimento colmo quando em sistema de rotação e no compartimento raiz quando cultivado em sistema de sucessão.

Nas plantas de ervilhaca, quantidade maior de carbono foi verificada nas raízes (46%), seguida pelas folhas (32%) e colmos (22%) (Tabela 3). O conteúdo de 4,5 Mg ha⁻¹ de biomassa seca da parte aérea da ervilhaca quantificado neste estudo, foi superior aos relatados por Aita et al. (2000 apud GIACOMINI et al., 2003) que foi de 3,82 Mg ha⁻¹ e por Giacomini et al. (2003) de 3,30 Mg ha⁻¹ em sistema de rotação de culturas no Rio Grande do Sul.

A aveia branca e o sorgo, cultivados no terceiro ano da rotação, apresentaram quantidades de carbono similares por hectare, 5,71 e 6,27 MgC ha⁻¹ (Tabela 3). Raízes e colmos concentraram maiores quantidades de carbono da biomassa seca da aveia, 34 e 30% respectivamente. Já no sorgo, as maiores concentrações de carbono foram atribuídas ao colmo (37%) e às folhas (32%).

Em se tratando dos valores de biomassa seca da aveia encontrados neste estudo, de 12,68 Mg ha⁻¹, os mesmos estão de acordo com os relatados por Floss et al. (2007) que foram, respectivamente, 10 Mg ha⁻¹ e 12,2 Mg ha⁻¹ nas fases de estágio leitoso e de início de maturação, não incluindo as raízes. Ceretta et al. (2002) relatam valores inferiores, correspondentes a 7,36 Mg ha⁻¹ de biomassa seca da parte aérea da aveia, quantificada na fase de florescimento em sistemas de rotação de culturas no Rio Grande do Sul. Com relação à biomassa seca do sorgo, Moraes (2001), Oliveira et al. (2002) e Torres et al. (2008) obtiveram valores de, respectivamente, 10,7 Mg ha⁻¹, 15,48 Mg ha⁻¹ e 7,1 Mg ha⁻¹, no estágio de pleno florescimento da cultura. A biomassa seca do sorgo quantificada neste estudo foi de 13,94 Mg ha⁻¹.

A média geral de produção de biomassa seca de cada cultura componente dos sistemas de sucessão e rotação analisados neste estudo foi superior ao valor de 6 Mg ha⁻¹, o qual é citado por Denardin e Kochhann (1993) e Darolt (1998) como sendo a quantidade mínima ideal de adição de matéria seca em um sistema de rotação de culturas, de maneira que se mantenha adequada a cobertura do solo. Nicoloso et al. (2006) mencionam, ainda, que o aporte anual de resíduos vegetais necessário para que sejam mantidos estáveis os teores de matéria orgânica do solo, deve ser superior a 8 Mg ha⁻¹ de massa seca, tendo em vista as condições climáticas do Rio Grande do Sul.

A diferença no comportamento e na produção de biomassa das diferentes espécies vegetais componentes de um sistema de sucessão e de rotação está diretamente relacionada às condições edafoclimáticas do local, à variedade de planta utilizada, ao sistema de manejo adotado e à suscetibilidade da mesma aos fatores bióticos e abióticos do ecossistema. De acordo com Agostinetto et al. (2000), as variações dos fatores edafoclimáticos em uma região podem estimular o desenvolvimento de determinada espécie e inibir outras. Sistemas de rotação envolvendo as culturas de aveia e ervilhaca têm sido cada vez mais adotados em áreas manejadas sob sistema plantio direto na região sul do Brasil, em decorrência, principalmente, da redução da área cultivada com trigo e dos benefícios sustentáveis proporcionados ao sistema. Dentre tais benefícios, Aita e Giacomini (2006) destacam a proteção do solo contra a erosão, o potencial de assimilação do CO₂ atmosférico e o acúmulo desse carbono no solo e, quando incluídas espécies de leguminosas, o fornecimento e adição de nitrogênio.

Quanto ao estoque de carbono no liter, os valores médios encontrados nas parcelas cultivadas com as espécies que compõem o sistema de rotação no primeiro ano (trigo/soja), no segundo ano (ervilhaca/soja) e no terceiro ano (aveia-branca/sorgo) foram superiores ao quantificado no sistema de sucessão trigo/soja (Tabela 3). Quantidades maiores de liter foram encontradas sobre o solo cultivado com soja comparativamente ao das demais culturas. O estoque de carbono no liter contabilizado durante o cultivo da soja em sucessão não apresentou diferença significativa do estoque do primeiro ano do sistema de rotação (soja antecedida pelo trigo) mas, diferiu estatisticamente daquele encontrado no segundo ano, onde a soja é antecedida pela ervilhaca (Tabela 4). Essa diferença provavelmente está relacionada à quantidade de massa verde produzida pelas culturas, e à taxa de decomposição dos resíduos deixados sobre o solo. De acordo com Longhi et al. (2007), a contribuição no aporte de

carbono pelas diferentes partes da planta pode influenciar significativamente a sua taxa de decomposição no solo, determinando a distribuição do C, que é perdido do sistema em forma de CO₂, e é retido no solo na biomassa microbiana na matéria orgânica do solo.

Embora a biomassa seca da aveia branca no terceiro ano da rotação tenha sido superior à da ervilhaca cultivada no segundo ano, a biomassa seca do liter coletado na superfície do solo, na safra de sorgo, a qual sucede a aveia branca, foi inferior à do liter coletado na safra de soja, que sucede a ervilhaca. Como se trata de uma área manejada sob plantio direto e tendo em vista que os resíduos de aveia permanecem por mais tempo sobre o solo, comparativamente aos resíduos de ervilhaca (AITA; GIACOMINI, 2006), era de se esperar uma quantidade maior de liter nas parcelas antecedidas pela aveia. Entretanto, 23% da biomassa da aveia correspondem ao compartimento panícula, o qual é exportado do sistema após colheita dos grãos, diminuindo assim o percentual de resíduos provenientes desta cultura, deixados na área. Já no caso da ervilhaca, todo o material vegetal da planta é deixado sobre o solo após a dessecação, tendo em vista ser cultivada para adubação verde.

Área comercial de grãos em Frederico Westphalen

Os valores de biomassa seca e de estoque de carbono contabilizados nas culturas componentes do sistema de rotação implantado nas áreas de LATOSSOLO e de CAMBISSOLO em Frederico Westphalen constam das Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5 – Biomassa seca e estoque de carbono nos compartimentos das plantas componentes do sistema de rotação trigo/soja – trigo/soja – trigo/milho e no liter, nas lavouras implantadas sob área de LATOSSOLO em Frederico Westphalen, RS

Primeiro e segundo anos da rotação (ano 1 e 2) – Trigo/Soja						
Compartimento	Trigo		Soja		Total anual	
	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)
Espiga/Vagem	3,51	1,58	1,06	0,48	4,57	2,06
Folha	1,00	0,45	1,04	0,47	2,04	0,92
Colmo/Haste	3,78	1,70	1,96	0,88	5,74	2,58
Raiz	0,86	0,38	0,37	0,17	1,23	0,55
Total da vegetação	9,15	4,12	4,44	2,00	13,59	6,12
Liter	3,69	1,66	5,26	2,37	8,95	4,03
Terceiro ano da rotação (ano 3) – Trigo/Milho						
Compartimento	Trigo		Milho		Total anual	
	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)
Espiga/Vagem	3,51	1,58	8,45	3,80	11,96	5,38
Folha	1,00	0,45	3,73	1,68	4,73	2,13
Colmo/Haste	3,78	1,70	5,64	2,54	9,42	3,94
Raiz	0,86	0,38	2,81	1,26	3,67	1,64
Pendão	-	-	0,12	0,06	0,12	0,06
Total da vegetação	9,15	4,12	20,75	9,34	29,90	13,15
Liter	3,69	1,66	0,86	0,39	4,55	2,05

Médias obtidas a partir de quatro amostras, cada uma constituída por 3 subamostras.

A média total anual do carbono estocado nas culturas implantadas sob área de LATOSSOLO foi 6,12 MgC ha⁻¹ no primeiro e segundo ano da rotação, e de 13,15 Mg ha⁻¹ no terceiro ano (Tabela 5). Para a área de CAMBISSOLO, esse estoque foi de 6,60 Mg ha⁻¹ nos anos 1 e 2 e de 13,47 Mg ha⁻¹ no ano 3 (Tabela 6).

Tabela 6 – Biomassa seca e estoque de carbono nos compartimentos das plantas componentes do sistema de rotação trigo/soja – trigo/soja – trigo/milho e no liter nas lavouras implantadas sob área de CAMBISSOLO em Frederico Westphalen, RS

Primeiro e segundo anos da rotação (ano 1 e 2) – Trigo/Soja						
Compartimento	Trigo		Soja		Total anual	
	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Carbono	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Carbono	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Carbono
Espiga/Vagem	3,20	1,44	0,79	0,35	3,99	1,79
Folha	0,98	0,44	1,00	0,45	1,98	0,89
Colmo/Haste	3,65	1,64	1,81	0,82	5,46	2,46
Raiz	2,58	1,16	0,66	0,30	3,24	1,46
Total da vegetação	10,41	4,68	4,26	1,92	14,67	6,60
Liter	4,46	2,01	6,05	2,72	10,51	4,73
Terceiro ano da rotação (ano 3) – Trigo/Milho						
Compartimento	Trigo		Milho		Total anual	
	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Carbono	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Carbono	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Carbono
Espiga/Vagem	3,20	1,44	8,35	3,76	11,55	5,20
Folha	0,98	0,44	2,82	1,27	3,80	1,71
Colmo/Haste	3,65	1,64	5,37	2,42	9,02	4,06
Raiz	2,58	1,16	2,86	1,29	5,44	2,45
Pendão	-	-	0,10	0,05	0,10	0,05
Total da vegetação	10,41	4,68	19,50	8,79	29,91	13,47
Liter	4,46	2,01	1,77	0,80	6,23	2,81

Médias obtidas a partir de quatro amostras, cada uma constituída por 3 subamostras.

Os totais de carbono nas plantas de trigo, soja e milho foram similares nos dois tipos de solos, não apresentando diferenças estatísticas significativas (Tabela 7). Entretanto, quando analisados os compartimentos das plantas separadamente, ocorreram diferenças significativas entre os dois solos em relação às raízes do trigo e as vagens da soja. O estoque de carbono na raiz do trigo na área de CAMBISSOLO foi três vezes maior que o quantificado na raiz do trigo plantado em área de LATOSSOLO. Já, a soja plantada em área de LATOSSOLO apresentou estoque de carbono nas vagens 30% superior à plantada na área de CAMBISSOLO. O estoque de carbono no milho não apresentou diferenças significativas em nenhum compartimento.

Tabela 7 – Estoque de carbono nas plantas de soja, trigo e milho nas áreas de Latossolo e de Cambissolo em Frederico Westphalen, RS

Compartimento	Estoque de Carbono (Mg C ha ⁻¹)					
	Trigo		Soja		Milho	
	Latossolo x Cambissolo	Latossolo x Cambissolo	Latossolo x Cambissolo	Latossolo x Cambissolo	Latossolo x Cambissolo	Latossolo x Cambissolo
Espiga/Vagem	1,58a	1,44a	0,48a	0,35b	3,80a	3,76a
Folha	0,45a	0,44a	0,47a	0,45a	1,68a	1,27a
Colmo/Haste	1,70a	1,64a	0,88a	0,82a	2,54a	2,42a
Raiz	0,38b	1,16a	0,17a	0,30a	1,26a	1,29a
Pendão					0,06a	0,05a
Total na vegetação	4,12a	4,68a	2,00a	1,92a	9,34a	8,79a
Liter	1,66a	2,01a	2,37a	2,72a	0,39a	0,80a

Com relação ao estoque de carbono nas plantas de milho, tanto na lavoura cultivada sob LATOSSOLO quanto em CAMBISSOLO, concentrações maiores foram encontradas nas espigas (42%), seguidas pelos colmos (27%), folhas (16%), raízes (14,4%) e pendões (0,6%). A média da biomassa seca total da parte aérea do milho cultivado em Frederico Westphalen (incluindo espigas e excluindo raízes) foi de 17,96 Mg ha⁻¹ na área de LATOSSOLO e de 16,64 Mg ha⁻¹ na área de CAMBISSOLO. Da Silva et al. (2009) relataram valores médios de 7,2 Mg ha⁻¹ para o milho manejado sob sistema plantio direto, enquanto Chioderoli et al. (2010) estimaram valores entre 8,4 a 10,25 Mg ha⁻¹ de matéria seca quando consorciado com espécies de forrageiras (Braquiária) em área manejada sob plantio direto há oito anos. Ressalta-se que os estudos mencionados referem-se à quantificação da massa seca da parte aérea da planta, excluindo as espigas. Quanto considerada somente a raiz da planta de milho, o valor médio de biomassa seca encontrado neste estudo, de 2,8 Mg ha⁻¹, vai ao encontro dos valores relatados por Bordin et al. (2008), que foram de 2,1 Mg ha⁻¹, em áreas manejadas sob plantio direto e de 3,8 Mg ha⁻¹ sob plantio convencional.

Nominalmente, o estoque de carbono no liter coletado na área de CAMBISSOLO superou o coletado na área de LATOSSOLO, o que é explicado pelo aporte de resíduos deixados na área pela cultura do milho, que foi cultivado no ano anterior na área de CAMBISSOLO, e dois anos antes na área de LATOSSOLO. Entretanto, os valores não diferiram estatisticamente nos dois tipos de solos, conforme Tabela 7.

Comparando os estoques de carbono do trigo e da soja do sistema de rotação de culturas implantado em área de LATOSSOLO em Frederico Westphalen, com os

quantificados nos sistemas de sucessão e rotação de culturas na área experimental da Embrapa Trigo em Passo Fundo, foram constatados estoques maiores nas plantas componentes deste último. O estoque de carbono no trigo no sistema de rotação na área experimental foi cerca de 20% superior ao trigo plantado em na área comercial em Frederico Westphalen. Com relação ao sistema de sucessão, os valores foram equivalentes. A soja plantada na área experimental no sistema de rotação apresentou um estoque de carbono 80% superior ao da área comercial, enquanto que na soja em sucessão, esta diferença foi mais que o dobro. Tais diferenças podem ser atribuídas às condições climáticas dos municípios (detalhes no Capítulo 1), às propriedades físicas e químicas do solo e às práticas de manejo adotadas. Ressalta-se ainda que, tanto na área experimental quanto na comercial foram plantadas a mesma variedade de soja, e a variedade de trigo plantada na área comercial, o Pampeano, apresenta porte superior à variedade Guamirim, plantado na área experimental da Embrapa.

A distribuição do carbono nos compartimentos das plantas de soja cultivadas na área comercial diferiu da quantificada na soja da área experimental. Na área experimental, as maiores concentrações de carbono foram atribuídas às hastes e raízes, enquanto que na soja sob plantio comercial, as vagens e as folhas concentraram quantidades maiores de carbono do que as raízes.

3.2 Estoque de carbono orgânico no solo

Área Experimental da Embrapa Trigo em Passo Fundo

A composição granulométrica do LATOSSOLO VERMELHO da área experimental da Embrapa Trigo (Tabela 8) indica a ocorrência de textura argilosa.

Tabela 8 – Composição granulométrica das áreas de Latossolo Vermelho em Passo Fundo, RS

Profundidade (cm)	Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)		
	Areia	Argila	Silte
0-5	222,38	495,58	282,04
5-10	220,33	527,60	252,06
10-20	221,25	525,98	252,77
20-30	190,67	564,71	244,62
Média 0-30	213,66	528,47	257,87

Médias obtidas a partir de quatro amostras, em cada profundidade.

A densidade do solo, concentração de carbono e estoque de carbono orgânico nas diferentes camadas do solo cultivado com a sucessão trigo/soja constam da Tabela 9.

Tabela 9 – Densidade do solo (Ds), concentração de carbono (C) e estoque de carbono orgânico (C_{org}) no sistema de sucessão de culturas trigo/soja na área experimental da Embrapa Trigo em Passo Fundo, RS

Prof. (cm)	Trigo*			Soja*			Média anual		
	Ds (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)	Ds (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)	Ds (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)
0-5	1,08	2,78	15,09	1,16	2,69	15,72	1,12	2,74	15,41
5-10	1,40	1,56	10,92	1,46	1,56	11,38	1,43	1,56	11,15
10-20	1,43	1,47	20,98	1,50	1,48	22,29	1,47	1,48	21,64
20-30	1,32	1,41	18,60	1,41	1,46	20,60	1,37	1,44	19,60
0-30**	1,31	1,81	65,60	1,38	1,79	69,99	1,34	1,80	67,80

* Médias obtidas a partir de quatro amostras, em cada profundidade.

** Os dados de Ds e de C correspondem a médias e de C_{org} ao somatório.

A densidade média do solo determinada nas profundidades de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm, durante as safras de soja e de trigo do sistema de sucessão de culturas, não apresentou diferença estatística significativa, segundo o teste de Tukey com 5% de probabilidade. Em ambas as safras, as camadas 5-10 cm e 10-20 cm foram as que apresentaram maiores adensamentos, valores de, respectivamente, 1,43 e 1,45 g cm⁻³, indicando uma possível compactação nessas profundidades. Incidências de compactação na camada subsuperficial do solo manejado sob plantio direto no estado Rio Grande do Sul tem sido relatadas em alguns estudos, dentre eles Denardin et al. (2008), Spera et al. (2006) e Spera et al. (2009b). Denardin et al. (2008) evidenciaram o crescimento limitado das raízes de milho e braquiária nas camadas de 0,05 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m de profundidade e atribuíram as causas dessa limitação à degradação física da camada subsuperficial do solo, expressa pelo aumento da densidade, da resistência do solo à penetração e da redução da permeabilidade, caracterizando-se como compactação.

A média anual do estoque de carbono nos 30 cm de solo na sucessão trigo/soja foi 67,80 MgC ha⁻¹ (Tabela 9) e não foram encontradas diferenças estatísticas significativas entre o estoque de carbono quantificado durante as safras de trigo e de soja.

Conforme a Tabela 10, observa-se que no sistema de rotação de culturas trigo/soja – ervilhaca/soja – aveia branca/sorgo, os valores de densidade encontrados nas camadas de solo, nos anos 1, 2 e 3 da rotação foram inferiores aos valores determinados na sucessão trigo/soja.

Camadas de solos mais adensadas no sistema de sucessão de culturas comparativamente ao sistema de rotação também foram encontradas por Albuquerque et al. (1995) entre a sucessão trigo/soja e a rotação trigo/soja – aveia preta/soja – aveia preta + ervilhaca /milho, em área de LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico argiloso no município de Cruz Alta, RS. Os autores atribuíram essa diferença à inclusão da aveia no sistema de rotação, visto que o sistema radicular agressivo desta cultura contribui para a reestruturação do solo. Desta forma, a diferença nos valores de densidade e de estoque de carbono no solo entre os sistemas de sucessão e rotação de culturas neste estudo pode estar relacionada aos efeitos que a cultura da aveia promove no solo. Além disso, o maior aporte de biomassa seca deixada na superfície no sistema de rotação, proporcionado, principalmente pela aveia, pelo sorgo e pelo milho (cultivado anteriormente na área) contribui para a melhoria e manutenção da condição estrutural do solo. Stone e Silveira (2001) enumeram alguns fatores que contribuem para a compactação das camadas superficiais do solo, destacando: o manejo inadequado, a pouca disponibilidade de resíduos culturais na superfície do solo e as condições hídricas no momento do preparo.

Considerando a densidade média nos 30 cm de solo dos sistemas de sucessão e de rotação de culturas, verifica-se que tais valores mantiveram-se abaixo de um valor considerado como limitante para os LATOSSOLOS argilosos do Rio Grande do Sul sob condições agrícolas, que, de acordo com Klein e Câmara (2007) apud SPERA (2009a), é em torno de $1,40\text{gcm}^{-3}$. Entretanto, alguns valores de densidade do solo diagnosticados nas camadas de 5-10 e 10-20 cm foram superiores a este limite, podendo ocasionar restrição ao aprofundamento das raízes, conforme mencionado anteriormente.

As médias anuais do estoque de carbono do solo, na profundidade de 30 cm, nos anos 1, 2 e 3 do sistema de rotação foram de, respectivamente, 64,68, 63,77 e 66,04 MgC ha^{-1} (Tabela 10). O terceiro ano, quando são cultivados a aveia branca e o sorgo, foi o que apresentou maior quantidade de carbono.

Tabela 10 – Densidade do solo (Ds), concentração de carbono (C) e estoque de carbono orgânico (C_{org}) nos anos 1, 2 e 3 do sistema de rotação de culturas trigo/soja – ervilhaca/soja – aveia branca/sorgo na área experimental da Embrapa Trigo em Passo Fundo, RS

Prof. (cm)	Trigo			Soja			Média anual		
	Ds (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)	Ds (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)	D (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)
0-5	1,07	2,80	14,93	1,08	2,54	13,64	1,08	2,67	14,29
5-10	1,29	1,48	9,50	1,42	1,56	11,08	1,36	1,52	10,29
10-20	1,33	1,47	19,51	1,44	1,51	21,71	1,39	1,49	20,61
20-30	1,22	1,43	17,38	1,44	1,51	21,60	1,33	1,47	19,49
0-30**	1,23	1,79	61,32	1,34	1,78	68,03	1,29	1,78	64,68
Prof. (cm)	Ervilhaca			Soja			Média anual		
	Ds (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)	Ds (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)	D (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)
0-5	0,88	2,66	11,69	1,06	2,78	14,35	0,97	2,72	13,02
5-10	1,36	1,53	10,42	1,43	1,55	11,26	1,40	1,54	10,84
10-20	1,34	1,50	20,09	1,37	1,47	20,17	1,36	1,49	20,13
20-30	1,30	1,48	19,34	1,37	1,43	20,22	1,34	1,46	19,78
0-30**	1,22	1,79	61,54	1,30	1,81	66,00	1,26	1,80	63,77
Prof. (cm)	Aveia Branca			Sorgo			Média anual		
	Ds (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)	Ds (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)	D (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)
0-5	0,98	2,81	13,95	1,12	2,86	15,96	1,05	2,84	14,96
5-10	1,31	1,53	10,00	1,41	1,57	11,02	1,36	1,55	10,51
10-20	1,28	1,47	18,70	1,38	1,49	20,52	1,33	1,48	19,61
20-30	1,40	1,45	20,26	1,46	1,49	21,65	1,43	1,47	20,96
0-30**	1,24	1,82	62,91	1,34	1,85	69,15	1,29	1,83	66,04

*Médias obtidas a partir de quatro amostras, em cada profundidade.

** Os dados de D e C referem-se a médias e C_{org} a somatório.

Conforme apresentado na Tabela 11 não foram encontradas diferenças estatísticas significativas no estoque de carbono do solo nos tratamentos sucessão e anos 1, 2 e 3 da rotação. Esse resultado contrapõe relatos de que sistemas de rotação de culturas que envolvem maior diversidade de espécies, especialmente, leguminosas e gramíneas, promovem maiores estoques de carbono no solo (BODDEY et al. 2010; JANTALIA et al. 2006; SISTI et al, 2004). Contudo, o carbono quantificado nas safras de verão e de inverno do ano 1 da rotação, quando são cultivados o trigo no inverno e a soja no verão, apresentou diferenças significativas nas profundidades de 5-10 e de 20-30 cm de solo.

Tabela 11 – Estoque de carbono no sistema de sucessão de culturas trigo/soja e nos anos 1, 2 e 3 da rotação trigo/soja – ervilhaca/soja – aveia branca/sorgo na área experimental da Embrapa Trigo em Passo Fundo, RS

Estoque de Carbono* (Mg C ha ⁻¹)					
	Prof. (cm)	Sucessão (T/S)	Rot. ano 1 (T/S)	Rot. ano 2 (E/S)	Rot. ano 3 (Ab/So)
Safra de inverno	0-5	15,09 aA	14,93 aA	11,69 aA	13,95 aA
	5-10	10,91 aA	9,50 aB	10,42 aA	10,00 aA
	10-20	20,98 aA	19,51 aA	20,09 aA	18,70 aA
	20-30	18,60 aA	17,38 aB	19,34 aA	20,26 aA
	0-30	65,59 aA	61,32 aA	61,54 aA	62,91 aA
Safra de verão	0-5	15,72 aA	13,64 aA	14,35 aA	15,96 aA
	5-10	11,38 aA	11,08 aA	11,26 aA	11,02 aA
	10-20	22,29 aA	21,71 aA	20,17 aA	20,52 aA
	20-30	20,60 aA	21,60 aA	20,22 aA	21,65 aA
	0-30	69,99 aA	68,03 aA	66,00 aA	69,15 aA
Média Anual	0-30	67,79 aA	64,68 aA	63,77 aA	66,04 aA

*Médias obtidas a partir de 4 amostras, em cada profundidade. Médias seguidas pela mesma letra minúscula, nas linhas, e pela mesma letra maiúscula, nas colunas, para cada profundidade de solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O estoque de carbono nos sistemas de sucessão e de rotação de culturas encontrados neste estudo condizem com valores relatados por Boddey et al. (2010) e Sisti et al. (2004) para áreas de LATOSSOLO VERMELHO no Rio Grande do Sul. Estudos realizados por Sisti et al. (2004) em uma área conduzida sob sistema plantio direto durante 13 anos em Passo Fundo, mencionam valores de 60,96 Mg C ha⁻¹ nos 30 cm de solo cultivados com a sucessão trigo/soja e de respectivamente, 64,97 e 69,58 Mg C ha⁻¹ nas rotações trigo/soja - ervilhaca/milho e trigo/soja - aveia/soja - ervilhaca/milho. Boddey et al. (2010) mencionam valores de 58,8 MgC ha⁻¹ no sistema de rotação aveia branca/soja – cevada/soja - ervilhaca/milho após 15 anos de cultivo em Passo Fundo e respectivamente, 72,5 e 81,1 MgC ha⁻¹ na sucessão trigo/soja e rotação trigo/soja - aveia/soja - aveia+ervilhaca/milho, em Cruz Alta, após 17 anos de cultivo.

Tanto no sistema de sucessão quanto no de rotação, as maiores concentrações de carbono, assim como de estoque de carbono total, foram observados na camada de 0-5 cm, onde está concentrada a maior parte das raízes. Esse fato é considerado típico para uma área manejada sob plantio direto, tendo em vista que neste sistema de manejo, os resíduos culturais são deixados na superfície e não ocorre o revolvimento do solo.

Área comercial de grãos em Frederico Westphalen

A composição granulométrica do solo das áreas comerciais de grãos em Frederico Westphalen (Tabela 12) indica presença de um LATOSSOLO VERMELHO de textura muito argilosa e de um CAMBISSOLO HÁPLICO de textura argilosa.

Tabela 12 – Composição granulométrica dos solos do tipo Latossolo e Cambissolo em Frederico Westphalen, RS

Profundidade (cm)	Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)					
	Latossolo			Cambissolo		
	Areia	Argila	Silte	Areia	Argila	Silte
0-5	71,50	547,50	381,00	210,13	391,56	398,31
5-10	64,50	590,25	345,25	168,38	439,38	392,25
10-20	60,63	586,31	353,06	187,17	442,17	370,67
20-30	61,00	614,69	324,31	191,67	443,33	365,00
Média 0-30cm	64,41	584,69	350,91	189,33	429,11	381,56

*Médias obtidas a partir de 4 amostras, em cada profundidade.

A densidade do solo, a concentração de carbono e o estoque de carbono orgânico determinados durante as safras de trigo e de soja implantadas nos dois tipos de solos são apresentados na Tabela 13.

Os valores de densidade média das camadas de solo analisadas não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre áreas de LATOSSOLO e CAMBISSOLO. Em ambas as áreas, a camada mais adensada foi a de 5-10 cm, com valores médios decrescentes nas camadas subsequentes. Estudos realizados por Bertol et al. (2000), em área de CAMBISSOLO no Sul do Brasil, demonstraram que o plantio direto promoveu aumento de 12% na densidade das camadas de solo até a profundidade de 15 cm, comparativamente ao preparo convencional, e que esse acréscimo não foi transmitido para as camadas mais profundas em decorrência do pouco tempo de condução do sistema, de seis anos. Por outro lado, Costa et al. (2003) observaram redução na compactação do solo após alguns anos de manejo sob sistema plantio direto, em consequência do aumento do nível de matéria orgânica na camada superficial. De acordo com Spera et al. (2009b), a utilização do sistema plantio direto com vários cultivos pode diminuir a densidade, devido ao acúmulo de resíduos vegetais na superfície, favorecendo assim a sua estrutura física do solo.

Tabela 13 – Densidade do solo (Ds), concentração de carbono (C) e estoque de carbono orgânico (C_{org}) em lavouras comerciais de grãos implantadas em áreas de LATOSSOLO e de CAMBISSOLO em Frederico Westphalen, RS

ÁREA DE LATOSSOLO									
Prof. (cm)	Trigo			Soja			Média anual		
	Ds (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)	Ds (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)	D (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)
0-5	1,16	2,36	13,67	1,28	2,26	14,48	1,22	2,31	14,08
5-10	1,28	1,52	9,76	1,40	1,23	8,55	1,34	1,38	9,16
10-20	1,33	1,09	14,54	1,32	1,18	15,72	1,33	1,14	15,13
20-30	1,32	0,84	11,22	1,27	0,97	12,18	1,30	0,91	11,70
0-30**	1,27	1,45	49,19	1,31	1,41	50,93	1,29	1,43	50,07
ÁREA DE CAMBISSOLO									
Prof. (cm)	Trigo			Soja			Média anual		
	Ds (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)	Ds (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)	D (kg dm ⁻³)	C (%)	C _{org} (MgC ha ⁻¹)
0-5	1,08	1,72	9,26	1,20	1,65	9,87	1,14	1,69	9,57
5-10	1,41	0,76	5,39	1,32	1,03	6,78	1,37	0,90	6,09
10-20	1,26	0,65	8,15	1,30	1,00	12,93	1,28	0,83	10,55
20-30	1,23	0,53	6,33	1,17	0,78	9,18	1,20	0,66	7,76
0-30**	1,25	0,92	29,13	1,24	1,11	38,77	1,25	1,02	33,97

* Médias obtidas a partir de 4 amostras, em cada profundidade.

** Os dados de D e C referem-se a médias e C_{org} a somatório.

O estoque médio anual de carbono contabilizado nos 30 cm na área de LATOSSOLO foi superior ao contabilizado na área de CAMBISSOLO (Tabela 13). Fatores que explicam essa diferença são o tempo que essas áreas vem sendo manejadas sob sistema plantio direto, que é de oito anos na área de LATOSSOLO e de quatro anos na área de CAMBISSOLO, o tipo de solo e suas características, além do relevo de cada área. A área de CAMBISSOLO apresenta maior declividade que a de LATOSSOLO, favorecendo a ocorrência de erosão. Além disso, o menor teor de argila no solo do tipo CAMBISSOLO propicia maior aeração e promove decomposição mais rápida do material orgânico e consequente perda de C para a atmosfera na forma de CO₂, conforme mencionado por Lal (1997).

A quantidade de carbono contabilizada na área de LATOSSOLO em Frederico Westphalen pode ser considerada baixa quando comparada aos valores quantificados neste mesmo tipo de solo em Passo Fundo (Tabela 14). Diferenças estatísticas significativas foram encontradas nos estoques de carbono das camadas de 10-20, 20-30 e na profundidade total de 0-30 cm das áreas de LATOSSOLOS em Passo Fundo e Frederico Westphalen, tanto na safra de verão quanto na de inverno. Ainda, com relação ao estoque de carbono em sistema plantio

direto em áreas de LATOSSOLOS VERMELHOS, Boddey et al. (2010) e Sisti et al. (2004) e relataram valores, respectivos, de 65,07 Mg C ha⁻¹ (após 13 anos de cultivo) e 58,8 MgC ha⁻¹ (após 15 anos), envolvendo a cultura da soja em diferentes sistemas de rotação neste mesmo município. Contribui para essa diferença as condições edafoclimáticas do local, a quantidade de material vegetal deixado sobre solo após a colheita e o tempo de condução da área com sistema de manejo plantio direto.

Tabela 14 – Estoque de carbono no solo cultivado com sucessão trigo/soja em áreas de LATOSSOLO VERMELHO em Frederico Westphalen e em Passo Fundo, RS

	Prof. (cm)	Estoque de Carbono (MgC ha ⁻¹)	
		Latossolo Vermelho Frederico Westphalen	Latossolo Vermelho Passo Fundo
Safra de trigo	0-5	13,67 aA	15,09 aA
	5-10	9,76 aA	10,92 aA
	10-20	14,54 bA	20,98 aA
	20-30	11,22 bA	18,69 aA
	0-30	49,19 bA	65,60 aA
Safra de soja	0-5	14,48 aA	15,72 aA
	5-10	8,55 aA	11,38 aA
	10-20	15,72 bA	22,29 aA
	20-30	12,18 bA	20,60 aA
	0-30	50,93 bA	69,99 aA

*Médias obtidas a partir de quatro amostras, em cada profundidade.

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, nas linhas, e pela mesma letra maiúscula, nas colunas, para cada camada de solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quanto ao carbono estocado no CAMBISSOLO, que foi em média 33,96 MgC ha⁻¹ (Tabela 13) também pode ser considerado baixo quando comparado ao estoque relatado por Bayer e Bertol (1999) que foi 60,0 MgC ha⁻¹ na profundidade de 20 cm, em uma área de CAMBISSOLO conduzida com o sistema de rotação de culturas sob plantio direto após oito anos.

Com relação à distribuição do carbono nas camadas do solo, maiores concentrações e estoques foram observadas nas camadas de 0-5 cm tanto na área de LATOSSOLO quanto de CAMBISSOLO, assim como relatado anteriormente para a área experimental de Passo Fundo. Com exceção da camada de 5-10 cm de solo da área de LATOSSOLO, em todas as demais camadas dos dois tipos de solos, o estoque de carbono quantificado durante a safra de soja foi superior ao quantificado durante a safra de trigo (Tabela 15). Ambas as áreas e ambas as

culturas apresentaram um decréscimo de carbono em proporções semelhantes nas profundidades subsequentes.

Diferenças significativas entre o estoque de carbono nos dois tipos de solo em Frederico Westphalen foram encontradas nas camadas de 0-5 cm do solo cultivado com soja e em todas as camadas do solo cultivado com trigo (Tabela 15). Essas diferenças podem ser atribuídas, particularmente, à baixa concentração de carbono (C%) quantificada, principalmente, durante a safra de trigo na área de CAMBISSOLO. Com relação ao carbono estocado nas diferentes profundidades do solo na safra de verão e de inverno nos dois tipos de solo, não ocorreram diferenças significativas entre as médias conforme Tabela 15.

Tabela 15 – Estoque de carbono nas áreas de Latossolo e de Cambissolo cultivados com lavoura comercial de grãos em Frederico Westphalen, RS

Estoque de Carbono (MgC ha⁻¹)			
	Prof. (cm)	Latossolo	Cambissolo
Safra de trigo	0-5	13,67 aA	9,26 bA
	5-10	9,76 aA	5,39 bA
	10-20	14,54 aA	8,15 bA
	20-30	11,22 aA	6,33 bA
	0-30	49,19 aA	29,12 bA
Safra de soja	0-5	14,48 aA	9,87 bA
	5-10	8,55 aA	6,78 aA
	10-20	15,72 aA	2,93 aA
	20-30	12,18 aA	9,18 aA
	0-30	50,93 aA	38,77 aA

*Médias obtidas a partir de 4 amostras, em cada profundidade.

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, nas linhas, e pela mesma letra maiúscula, nas colunas, para cada camada de solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

– As plantas de soja cultivadas em sistema de sucessão de culturas na área experimental apresentaram maior estoque de carbono do que as cultivadas no sistema de rotação. Já o trigo apresentou maior estoque de carbono quando cultivado em rotação.

– A diversificação das culturas de inverno no sistema de rotação, na área experimental, proporcionou aumento no estoque de carbono no liter, comparativamente ao sistema de sucessão.

– Os estoques de carbono quantificados nas plantas de soja, trigo e milho cultivados em área comercial de grãos foram semelhantes nas áreas de LATOSSOLO VERMELHO e de CAMBISSOLO.

– As plantas de trigo e de soja implantadas em área de LATOSSOLO VERMELHO na área experimental apresentaram maior quantidade de carbono que as plantas de trigo e de soja cultivadas sob este mesmo tipo de solo nas lavouras comerciais.

– A diversificação de culturas de inverno no sistema de rotação da área experimental contribuiu para a redução do adensamento nas camadas de solo, comparativamente ao sistema de sucessão.

– O estoque de carbono no solo cultivado com a sucessão trigo/soja na área experimental foi superior à média dos três anos da rotação.

– Estoques maiores de carbono no solo cultivado com a sucessão trigo/soja estão associados aos valores maiores de densidade diagnosticada neste sistema.

– A lavoura comercial de grãos implantada na área de LATOSSOLO VERMELHO apresentou maior estoque de carbono no solo, comparativamente à área de CAMBISSOLO.

– O estoque de carbono no LATOSSOLO VERMELHO em Frederico Westphalen é considerado baixo se comparado ao estoque quantificado neste mesmo tipo de solo em Passo Fundo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINETTO, D.; FERREIRA, F. B.; STOCH, G.; FERNANDES, F. F.; PINTO, J. J. O. Adaptação de Espécies Utilizadas para Cobertura de Solo no Sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.6 n. 1, p. 47-52, 2000.

AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Plantas de cobertura de solo em sistemas agrícolas. In: ALVES, B. J. R. et al. **Manejo de sistemas agrícolas: impacto no seqüestro de C e nas emissões de gases de efeito estufa**. Porto Alegre: Gênese, 2006. 216 p.

ALBUQUERQUE, J. A.; REINERD, 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, n. 1, p. 115-119, 1995.

AREVALO, L. A.; ALEGRE, J. C.; VILCAHUAMAN, L. J. M. **Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. 41p. (Documento, 73).

BAYER, C., BERTOL, I. Características químicas de um cambissolo húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase à matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 687-694, 1999.

BAYER, C., MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil Tillage Research**, v. 54, n. 1-2, p. 101-109, 2000.

BAYER, C.; DIECKOW, J. Metodologia para determinação do seqüestro de carbono em solos sob plantio direto no Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE PLANTIO DIRETO E MEIO AMBIENTE: SEQUESTRO DE CARBONO E QUALIDADE DA ÁGUA, Foz do Iguaçu, 2005. **Anais**. Foz do Iguaçu, 2005. p. 58-62.

BERNOUX, M.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P.; SIQUEIRA NETO, M.; METAY, A.; PERRIN, A. S.; SCOPEL, E.; BLAVET, D.; PICCOLO, M. C.; PAVEI, M.; MILNE, E. Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 26, n. 1, p.1-8, 2006.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J. M.; REIS, E. F.; DILLY, L. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciência Rural**, v. 30, n.1, p. 91-95, 2000.

BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; DOS 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.

BORDIN, I.; NEVES, C. S. V. J.; MEDINA, C. C.; DOS SANTOS, J. C. F.; TORRES, E.; URQUIAGA, S. Matéria seca, carbono e nitrogênio de raízes de soja e milho em plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 12, p. 1785-1792, 2008.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1986. 94 p. (Boletim Técnico, 106).

CERETTA, C. A.; BASSO, C. J.; HERBES M.G.; POLETTO, N.; SILVEIRA, M. J. Produção e decomposição de fitomassa de plantas invernais de cobertura de solo e milho, sob diferentes manejos da adubação nitrogenada. **Ciência Rural**, v. 32, n. 1, p. 49-54, 2002.

CHIODEROLI, C. A.; MELLO, L. M. M.; GRIGOLLI, P. J.; SILVA, J. O. R.; CESARIN, A. L. Consorciação de braquiárias com milho outonal em plantio direto sob pivô central. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1101-1109, 2010.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 527-535, 2003.

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

DAROLT, M. R. Princípios para implantação e manutenção do sistema. In: DAROLT, M. R. **Plantio direto: pequena propriedade sustentável**. Londrina: Iapar, 1998. p. 16-45 (Circular, 101).

DE MARIA, I. C. Erosão e terraços em plantio direto. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 1, p.17-21, 1999.

DENARDIN, J. E. Data em defesa da Conservação do Solo: Pesquisadores vão discutir com a imprensa os problemas que levam a erosão do solo e a baixa fertilidade. **Diário da Manhã**, Passo Fundo, 15 abr. 2011. Disponível em: <<http://www.diariodamanha.com/noticias.asp>>. Acesso em: 4 maio 2011.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Requisitos para a implantação e a manutenção do sistema plantio direto. In: EMBRAPA. **Plantio direto no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa-NPT/Fecotrigo/Fundação ABC/Aldeia Norte, 1993. p. 19-27.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; SANTI, A.; FAGANELLO, A.; SATTTLER, A. **Efeito da consorciação milho-braquiária (*Brachiária brizantha*) na mitigação da compactação do solo**. [Passo Fundo]: Embrapa, 2008. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento *Online*, 54).

DERPSCH, R.; CALEGARI, A. **Plantas para adubação verde de inverno**. 2. ed. Londrina: Iapar, 1992. 80 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006. 412 p.

FEBRAPDP - Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. Evolução da Área de Plantio Direto no Brasil. Disponível em: <www.febrapdp.org.br> Acesso em: 11 abr. 2011.

FLOSS, E. L.; SOARES FILHO, C. V.; PALHANO, A. L. ; PRIMAZZI, L. M. Crescimento, produtividade e composição química da aveia-branca. **Acta Scientiarum**, v. 29, n. 1, p. 1-8, 2007.

GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; VENDRUSCOLO, E. R., CUBILLA, M; NICOLOSO, R. S.; FRIES, M. R. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 325-334, 2003.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Land use, land use change and forestry**: A special report. [WATSON, R. T.; NOBLE, I. R.D. J. (Ed.)]. Cambridge: Cambridge University, 2001. Intergovernment Panel on Climate Change. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/land_use/index.php?idp=0>. Acesso em: 12 fev. 2008.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry**. [PENMAN, J.; GYTARSKY, M.; HIRAISHI, T.; KRUG, T.; KRUGER, D.; PIPATTI, R.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE K.; WAGNER, F.(Ed.)]. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2003. National Greenhouse Gas Inventories Programme. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2008.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**: Agriculture, forestry and other land use. [EGGLESTON, H.S.; BUENDIA, L.; MIWA, K; NGARA T.; TANABE, K (Ed.)]. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006. vol. 4. National Greenhouse Gas Inventories Programme. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>>. Acesso em: 12 fev. 2008.

JANTALIA, C. P.; PETRERE, C.; AITA, C.; GIACOMINI, S.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. **Estoques de carbono e nitrogênio do solo após 17 anos sob preparo convencional e plantio direto em dois sistemas de rotação de culturas em Cruz Alta, RS**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia , 2006. 42 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 13).

LAL, R. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. **Soil and Tillage Research**, v. 43, n. 1, p. 81-107, 1997.

LAL, R. Agricultural activities and the global carbon cycle. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 70, n. 2, p. 103-116, 2004.

LONGHI, R.; GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; SILVA, S. D. A.; SANTOS, G. F.; REDIN, M.; OLIVO, J.; DALAZEN, G. Adição de Carbono e Produção de Biomassa por Culturas Bioenergéticas de Verão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, XXXI, 2007, Gramado.

MARTORANO, L. G. **Padrões de resposta da soja em resposta a condições hídricas do sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT**. 2007. 170 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

MORAES, R. N. S. **Decomposição das palhadas de sorgo e milheto, mineralização de nutrientes e seus efeitos no solo e na cultura do milho em plantio direto**. 2001. 90 p. Dissertação (Mestrado)–Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

NICOLOSO, R. S.; LANZANOVA, M. E.; LOVATO, T. Manejo das pastagens de inverno e potencial produtivo de sistemas de integração lavoura-pecuária no estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 36, n. 6, p. 1.799-1.805, 2006.

OLIVEIRA, T. K.; CARVALHO, G. J.; MORAES, R. N. S. Plantas de cobertura e seus efeitos no feijoeiro e no solo em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 8, p. 1079-1084, 2002.

SÁ, J. C. D. M.; CERRI, C. C.; LAL, R.; DICK, W. A.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E. Soil organic carbon and fertility interactions affected by a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v.104, n. 1, p. 56-64, 2009.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. de. Assistat-Statistical Assistance Software. Versão 7.6 Beta, 2011. Disponível em: < <http://www.assistat.com/index.html>>. Acesso em: 21 fev. 2011.

SISTI, C. P. J.; dos SANTOS, H. P.; KOCHHANN, R. A.; 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.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeito de pastagens de inverno e de verão em características físicas de solo sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 36, n. 4, p.1193-1200, 2006.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Integração lavoura e pecuária e os atributos físicos de solo manejado sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 129-136, 2009a.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O.; KOCHHANN R. A.; AVILA, A. Atributos físicos do solo em sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas. **Bragantia**, v. 68, n. 4, p. 1079-1093, 2009b.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 395-401, 2001.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; FABIAN, A. J. Produção de fitomassa por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, n. 3, p. 421-428, 2008.

CAPÍTULO 3

CONTABILIZAÇÃO DOS ESTOQUES DE CARBONO EM CENÁRIOS FLORESTAIS COM *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* NO RIO GRANDE DO SUL

1. INTRODUÇÃO

A maior parte das terras ocupadas pela agricultura e pela pecuária já foi um dia coberta por florestas naturais. Constata-se na história da agricultura brasileira que, num primeiro momento, as florestas foram eliminadas dando lugar à pecuária e na sequência, à agricultura. O desmatamento dessas áreas provocou a redução das florestas naturais, diminuiu a disponibilidade de madeira, aumentou a degradação dos solos e intensificou o acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, sendo este último efeito, uma das possíveis causas do principal problema ambiental enfrentado atualmente pela humanidade: o aquecimento global.

No Rio Grande do Sul (RS), o histórico do uso da terra não é diferente. O estado é caracterizado por uma economia tipicamente agrícola, onde a produção de grãos e a pecuária se destacam como atividades principais. Entretanto, áreas ocupadas atualmente com tais tipos de uso têm demonstrado fragilidade e alta susceptibilidade à degradação ambiental. A região noroeste do estado, por exemplo, é caracterizada como área favorável e representativa da produção de soja segundo o zoneamento agroclimático (BRASIL, 2008). Entretanto, a deficiência hídrica em determinados períodos de desenvolvimento dessa cultura, associada às práticas de manejo adotadas, têm ocasionado quebras sucessivas da produtividade e recorrentes prejuízos econômicos ao produtor. Diante desse contexto, tem se observado tendências para mudanças nos sistemas de uso da terra, onde os aspectos relativos à sustentabilidade ambiental e à criação de novas alternativas sócio-econômicas vêm assumindo importância cada vez maior para os produtores daquela região. Estudos realizados por Dossa et al. (2000a), Ribaski et al. (2005) e Rodigheri et al. (2005) no estado do RS constataram competitividade e viabilidade de sistemas florestais, agroflorestais e silvipastoris quando comparados com atividades de produção agrícola ou pecuária.

Com o advento de novos instrumentos de política climática global (UNFCCC, 2003; 2007) o plantio de florestas de rápido crescimento, visando também o sequestro de carbono para geração de créditos, caracteriza-se como uma alternativa promissora de uso da terra para gerar benefícios econômicos e ambientais.

O interesse nas florestas plantadas para fixação de carbono se justifica em razão de apresentarem rápido crescimento, o que significa grande capacidade de remover CO₂ da atmosfera e estocar carbono em menor intervalo de tempo. Espécies do gênero eucalipto e pinus, por exemplo, possuem elevadas taxas fotossintéticas, representando um grupo de espécies bastante eficiente para esta finalidade (REIS et al., 1994). Segundo Houghton et al. (1983), povoamentos florestais com espécies de rápido crescimento constituem um componente importante do ciclo de carbono global, pois consistem em um reservatório potencial, o qual pode mitigar os efeitos da mudança do clima. Florestas de alta produção de biomassa têm uma capacidade elevada de sequestrar o CO₂ atmosférico e estocá-lo na biomassa arbórea, na serapilheira e no solo (KILAWÉ et al., 2001). De acordo com Lal (2004), os reflorestamentos implantados em áreas com baixos estoques de carbono, tais como áreas desmatadas e áreas ocupadas com agricultura, têm sido reivindicado para sequestro de carbono, inclusive no solo.

Estimativas indicam que os plantios florestais poderão mitigar adicionalmente 1-2GtC por ano entre 1995 e 2050 (BROWN et al., 1996; KAUPPI et al., 2001). No entanto, alcançar esta mitigação de carbono exigirá, entre outras coisas, a adoção de métodos precisos para avaliar a dinâmica dos fluxos e armazenamento de carbono nas diferentes espécies, sob diferentes regimes de manejo, além da adequada elaboração, implantação e monitoramento dos projetos de florestamento e reflorestamentos, de acordo com os princípios que regem as políticas intergovernamentais de mudança climática (UNFCCC, 2003; 2007; IPCC, 2003).

A determinação do estoque de carbono sequestrado por determinado tipo de vegetação depende da quantificação da variável biomassa, a qual pode ser realizada por métodos diretos e indiretos. O método direto implica na realização de medições em campo, envolvendo a marcação de parcelas, o corte e a separação dos compartimentos das árvores, a coleta, a secagem e a pesagem de amostras (SANQUETA, 2002). Já pelo método indireto, geram-se estimativas, obtidas por meio de relações quantitativas, constituídas a partir da

combinação de variáveis extraídas de inventários florestais, tais como diâmetro, altura, densidade e tamanho de copa (SANQUETA, 2002; SOARES et al., 1996).

A quantificação do estoque de carbono de forma direta é um processo financeiramente oneroso e que demanda tempo. De acordo com Paul et al. (2003), torna-se cada vez menos viável a amostragem de estoques de carbono em vários locais, de vários tipos de solo, clima e regimes de manejo de uma forma suficientemente detalhada. Alternativamente, modelos capazes de prever a dinâmica do carbono, tanto na vegetação quanto no solo, são ferramentas essenciais para avaliar o potencial de estocagem de carbono em um sistema e sua contribuição para a mudança climática global.

Uma ampla variedade de modelos que simulam o estoque e o fluxo de carbono em sistemas florestais tem sido utilizada para contabilização do carbono. A maioria deles ainda não foi aceita como uma metodologia aprovada para contabilização dos créditos de carbono dos projetos florestais no contexto das diretrizes da *United Nations Framework Convention on Climate Change* - UNFCCC (UNFCCC, 2001; 2003). Os modelos de contabilização de carbono variam desde aqueles que calculam o estoque de carbono baseado nos efeitos da mudança do uso da terra, àqueles que consideram os efeitos das variáveis ambientais, como por exemplo, o efeito das mudanças climáticas e o incremento de CO₂ na atmosfera.

O modelo CO₂Fix, desenvolvido como parte do projeto “Sequestro de Carbono em Reflorestamentos e Florestas Manejadas Sustentavelmente” – CASFOR Project (MASERA et al., 2003; SCHELHAAS et al., 2004), simula a dinâmica de carbono em sistemas florestais, constituídos por diferentes espécies, de idades e estruturas distintas. O modelo constitui uma metodologia reconhecida e aprovada para ser utilizada em projetos de créditos de carbono florestais de acordo com as diretrizes da UNFCCC, além de já ter sido aplicado em projetos já registrados para geração de créditos de carbono. Embora o CO₂Fix já tenha sido calibrado e validado para condições temperadas e tropicais, ainda são escassos os estudos que contemplam a aplicação do modelo em florestas implantadas em regiões tropicais. Dentre as parametrizações e validações realizadas para regiões tropicais, destacam-se os trabalhos realizados por Masera et al. (2003), em povoamentos de *Pinus sp.* e *Quercus sp.* no México e em sistema agroflorestal com *Cordia alliodora*, *Erythrina poeppigiana* e *Coffee sp.* na Costa Rica; por Jong et al. (2007), em povoamentos de pinus e carvalho no México; e por Martins (2004), para estimativa de carbono em reflorestamentos de mata ciliar no Brasil.

Partindo da premissa de que o plantio de florestas comerciais e a geração de créditos de carbono seja uma alternativa viável de uso da terra para algumas áreas cultivadas com soja no RS e que o modelo CO₂Fix gera resultados satisfatórios na contabilização de estoques de carbono na biomassa e no solo para as condições edafoclimáticas daquela região, o objetivo principal deste estudo foi aplicar o modelo CO₂Fix V3.2 para quantificar o estoque de carbono na vegetação e no solo, em cenários florestais passíveis de implantação na região noroeste do RS.

Os objetivos específicos foram:

- Simular cenários florestais utilizando espécies de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* para as condições edafoclimáticas dos municípios de Passo Fundo e Frederico Westphalen no RS;
- Estimar o crescimento e a produção volumétrica das espécies nos cenários simulados utilizando o simulador de crescimento SisEucalipto e SisPinus;
- Aplicar o modelo CO₂Fix V.3.2 para quantificar os estoques de carbono na vegetação e no solo nos cenários simulados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo deste trabalho consiste nos municípios de Passo Fundo e Frederico Westphalen, situados na região noroeste do Rio Grande do Sul. Passo Fundo pertence à região fisiográfica denominada Planalto Médio e está localizado nas coordenadas geográficas 28° 15' 39" S, 52° 24' 33" W, a uma altitude de 687 m. Frederico Westphalen, localizado a 566 m, nas coordenadas 27° 21' 33" S e 53° 23' 40" W, pertence à região denominada Médio Alto Uruguaí.

Segundo a classificação de Köppen, o clima em Passo Fundo é descrito como subtropical úmido (Cfa) com temperatura anual média de 17,5°C e precipitação pluvial anual de 1.787 mm. Os invernos são rigorosos podendo atingir valores negativos, com geadas frequentes e neve ocasional. O clima na região de Frederico Westphalen é caracterizado conforme a classificação de Köppen como subtropical úmido (Cfa), com temperatura média anual de 19,4°C e precipitação anual de 1.819 mm (CLIMATE-CHARTS, 2008).

Os solos predominantes em Passo Fundo pertencem às classes dos LATOSSOLOS VERMELHOS Distróficos húmicos e NITOSSOLOS VERMELHOS Distroféricos típicos, representando, respectivamente, 62% e 35% da área do município. As classes de relevo predominantes são suave ondulado e ondulado, com declividade variando de 3 a 20%. Em Frederico Westphalen as áreas ocupadas com CAMBISSOLOS HÁPLICOS correspondem a 68% da área total do município, enquanto que os LATOSSOLOS VERMELHOS Distroféricos ocupam cerca de 28%. A maior parte do relevo é ondulado e fortemente ondulado, com declividades variando de 8 a 45% (BRASIL, 1973; IBGE, 1986; STRECK et al., 2008).

2.2 Simulação de cenários florestais

Tendo em vista que as principais essências florestais plantadas no estado do Rio Grande do Sul pertencem aos gêneros eucalipto e pinus (SEMA; UFSM 2001), as espécies *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* foram selecionadas para compor os cenários florestais a serem simulados para os municípios de estudo. As duas espécies apresentam sensibilidade média a geadas e secas, e são recomendadas pelo zoneamento agrícola de risco climático para plantio naquela região (HIGA et al., 2008; HIGA; WREGE, 2010).

2.2.1 Espécies e regimes de manejo

Foram simulados cenários florestais contemplando o cultivo solteiro das espécies de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda*, com diferentes períodos de rotação e regimes de manejo. O sistema de manejo foi definido visando o uso múltiplo da madeira de acordo com recomendações e estudos realizados em plantios dessas espécies no RS. Para todos os cenários, foi considerado um horizonte de planejamento do projeto de 21 anos, conforme descrito a seguir:

Cenário 1: *Eucalyptus grandis* manejado para produção de celulose: plantio homogêneo de 1.666 árvores ha⁻¹, espaçamento de 3,0 m x 2,0 m, com uma taxa de sobrevivência de 95%. Uso da madeira principalmente para produção de celulose, com corte raso aos sete anos de idade e condução da segunda e terceira rotações por rebrota. Neste cenário, foram simuladas três rotações de sete anos, completando o ciclo de 21 anos. Na segunda e na terceira rotações, foi considerado um declínio de 10% da produção comparativamente à rotação anterior. O sortimento da madeira a cada sete anos contempla uso para celulose e energia. O diâmetro mínimo de tora adotado para a produção de celulose foi de 8 cm com comprimento mínimo de 1,2 m, segundo preconizado no modelo SisEucalipto (OLIVEIRA, 1995).

Cenário 2: *Eucalyptus grandis* manejado para produção de madeira serrada: plantio homogêneo de 1.666 árvores ha⁻¹, espaçamento de 3,0 m x 2,0 m, com uma taxa de sobrevivência de 95% e manejo para serraria conforme recomendado por Rodigheri et al. (2002). O sistema de manejo envolve dois desbastes seletivos, sendo o primeiro no sétimo ano e o segundo no décimo-segundo ano, ambos com redução de aproximadamente 50% do número de plantas do povoamento. Após o segundo desbaste a densidade do plantio é de em média 400 árvores ha⁻¹, sendo estas conduzidas até o vigésimo-primeiro ano para o corte final. O sortimento da madeira dos desbastes e da colheita final contempla uso para serraria, celulose e energia. O diâmetro mínimo de tora adotado para a produção de celulose foi de 8 cm, com comprimento mínimo de 1,2 m. A madeira destinada para serraria foi dividida em duas categorias: serraria I (toras com diâmetro mínimo de 25cm e comprimento de 1,35m) e

serraria II (toras com diâmetro mínimo de 15cm e comprimento de 2,40 m) conforme preconizado no modelo SisEucalipto (OLIVEIRA, 1995).

Cenário 3: *Pinus taeda* manejado para produção de madeira serrada: plantio homogêneo de 1.666 árvores ha⁻¹ com espaçamento de 3,0 m x 2,0 m. Manejo para serraria conforme recomendado por Dossa et al. (2002), com dois desbastes e corte raso aos 21 anos. O primeiro desbaste ocorre no oitavo ano, com remoção de 35% no número de plantas. O segundo desbaste aos 12 anos, com redução de 50%. O corte final é previsto para ocorrer no vigésimo-primeiro ano, quando existem, em média, 500 árvores por hectare. No período de 21 anos, a madeira produzida contempla a possibilidade de ser utilizada para produção de energia, celulose e serraria. O diâmetro mínimo de tora adotado para a produção de celulose foi de 8 cm, com comprimento mínimo de 1,2 m. A madeira destinada para serraria foi dividida em duas categorias: serraria I (toras com diâmetro mínimo de 25 cm e comprimento de 1,35 m) e serraria II (toras com diâmetro mínimo de 15cm e comprimento de 2,40 m) conforme preconizado no modelo SisPinus (OLIVEIRA, 1995).

2.3 Prognose de crescimento e de produção nos cenários florestais

A estimativa de crescimento e de produção em volume de madeira do tronco das espécies nos sistemas florestais foram obtidas utilizando o programa de simulação florestal SIS – SisPinus e SisEucalipto, desenvolvido por Oliveira (1995). O programa Sis gera tabelas de prognose do crescimento e da produção anual, com resultados por classes de diâmetro para as árvores provenientes de desbaste e do corte final.

Para simulação do crescimento e da produção florestal são utilizados como dados de entrada a densidade do plantio, o percentual de sobrevivência, o período de rotação e o índice de sítio (IS) referente à espécie e ao local do plantio. Com exceção do índice de sítio, foram adotados parâmetros semelhantes para os dois municípios (Tabela 1). Para a simulação em Frederico Westphalen, foi utilizado IS 20 e IS 30 para o pinus e o eucalipto, respectivamente. E em Passo Fundo, IS 21 para o pinus e IS 33 para eucalipto. Os índices de sítio foram obtidos em estudos realizados por Mainard et al. (1996), Pavan et al. (2010) e Selle et al. (1994) no RS. Os parâmetros de entrada utilizados no SisEucalipto e no SisPinus para se proceder as simulações constam da Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para entrada nos programas SisEucalipto e SisPinus

Espécies e densidade de plantio (árvores ha ⁻¹)	Rotação (anos)	Taxa de Sobrev. (%)	Índices de Sítio		Fonte
			FW	PF	
<i>Eucalyptus grandis</i> 1.666	7	95	30	33	Oliveira et al. (2008); Pavan et al. (2010)
<i>Eucalyptus grandis</i> 1.666	21	95	30	33	Oliveira et al. (2008); Pavan et al. (2010)
<i>Pinus taeda</i> 1.666	21	95	20	21	Dossa et al. (2002); Mainard (1996); Selle et al. (1994)

A simulação da prognose de crescimento e da produção madeireira das espécies foi realizada considerando plantios homogêneos, com mudas de boa qualidade e aplicação de manejo adequado para cada espécie.

2.4 Aplicação do modelo CO₂Fix V3.1 para estimar estoques de carbono na biomassa arbórea e no solo

Para estimar o estoque de carbono nos cenários florestais, foi utilizado o modelo de contabilização de carbono CO₂Fix versão 3.1 (SCHELHAAS et al., 2004). O CO₂Fix V.3.1 é um modelo de simulação de ecossistemas que quantifica o estoque e o fluxo anuais de carbono em povoamentos florestais e em produtos madeireiros. A versão 3.1 do CO₂Fix é composta pelos seguintes módulos: biomassa, solos, produtos, bioenergia, financeiro e de contabilização do carbono, conforme demonstrado na Figura 1 (SCHELHAAS et al., 2004).

No presente estudo foram utilizados os módulos biomassa e solos para estimar os estoques de carbono na biomassa arbórea e no solo. Dados de produtividade anual de madeira do tronco gerados pelo SisEucalipto e SisPinus foram utilizados como dado principal de entrada do modelo. Dados complementares para parametrização do CO₂Fix foram obtidos em consultas bibliográficas e constam da Tabela 2. Para todos os cenários foi considerado um horizonte de planejamento de 21 anos.

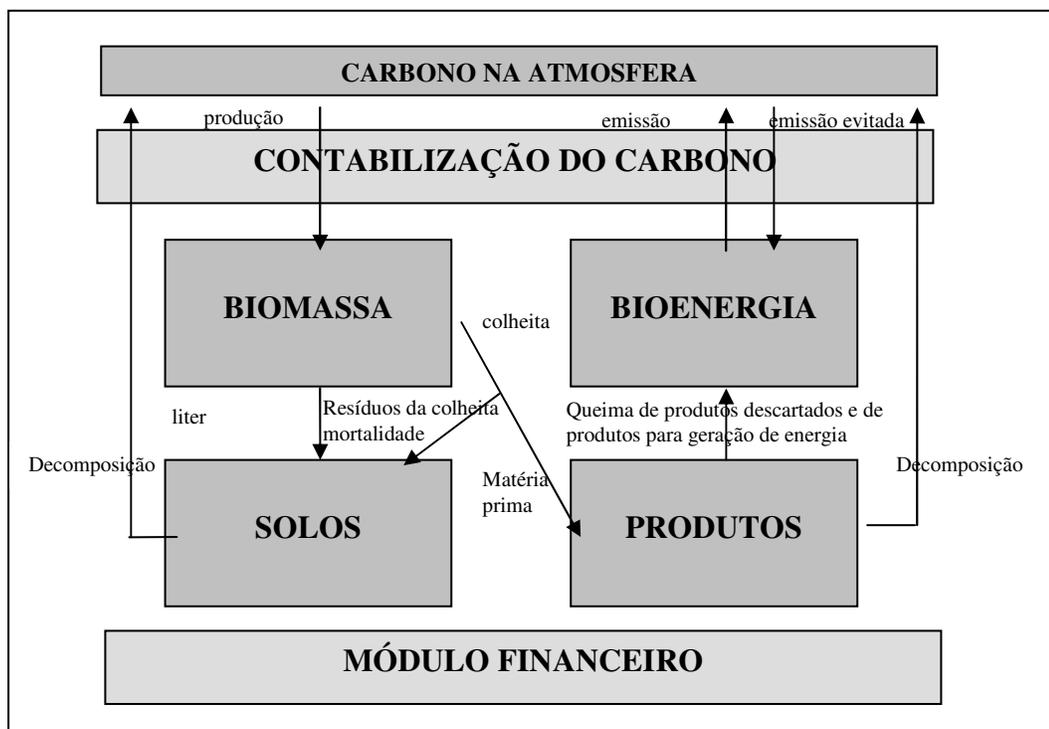


Figura 1 – Estrutura geral do modelo CO₂Fix V.3.1 (SCHELHAAS et al., 2004).

2.4.1 Estoque de carbono na biomassa arbórea - Módulo Biomassa

O estoque e o fluxo de carbono na biomassa acima e abaixo do solo, são estimados no CO₂Fix V.3.1 utilizando a abordagem “*cohort*³ *model*” (REED, 1980). O carbono estocado na biomassa do sistema florestal é expresso pela soma do carbono estocado no tronco, nos galhos, nas folhas e nas raízes, de todos os grupos de árvores que compõem o sistema, em MgC ha⁻¹.

O principal dado de entrada do módulo biomassa é a taxa de incremento corrente anual (ICA) da espécie em termos de volume do tronco (m³ ha⁻¹ ano⁻¹). O CO₂Fix estima o estoque de biomassa e de carbono com base nos valores de ICA. Além do ICA, o modelo requer dados de densidade da madeira e o conteúdo de carbono na matéria seca, os quais foram obtidos por meio de consultas bibliográficas conforme Tabela 2. A produção volumétrica durante o período de rotação considerado, bem como os dados de incremento anual de cada espécie, para cada sistema de manejo, foram gerados pelos programas SisPinus e SisEucalipto (OLIVEIRA, 1995) conforme item 2.3.

³ *Cohort* é definido como um grupo de árvores ou de espécies, que apresentam crescimento semelhante, e que podem ser tratadas como uma única entidade dentro do modelo.

A biomassa dos galhos, folhas e raízes foi calculada utilizando frações relativas derivadas do crescimento do tronco obtidas em publicações bibliográficas conforme consta na Tabela 2. Além das taxas de incremento de biomassa, o modelo considera os parâmetros mortalidade devido à senescência, mortalidade devido às operações da colheita, taxa de *turnover* (reposição dos galhos, folhas e raízes) e biomassa retirada do sistema por operações de desbastes e de colheita. Este balanço é representado pela seguinte equação:

$$Cb_{it+1} = Cb_{it} + Kc [Gb_{it} - Ms_{it} - T_{it} - H_{it} - Ml_{it}] \text{ (MgC ha}^{-1}\text{)}$$

Onde: Cb_{it+1} = carbono estocado na biomassa viva da espécie “i” no tempo “t+1” em MgC ha⁻¹; Cb_{it} : carbono estocado na biomassa da espécie i no ano t; Kc = constante para conversão de biomassa em carbono (0,50); Gb_{it} : incremento da espécie i no ano t; Ms_{it} = mortalidade devido à senescência; T_{it} = taxa de *turnover*; H_{it} = biomassa removida devido operações de desbastes e colheita; Ml_{it} = mortalidade devido operações da colheita.

Tendo em vista que a taxa de mortalidade das diferentes espécies foi computada na predição do crescimento e estimativa de volume pelos programas “SIS” a mesma não foi incluída no modelo CO₂Fix, evitando assim a dupla contagem da taxa de mortalidade. Procedimento semelhante foi adotado na contabilização do estoque de carbono em povoamentos de *Picea abies* utilizando o modelo CO₂Fix (MASERA et al., 2003). Os parâmetros utilizados no módulo biomassa do CO₂ FixV3.2 constam da Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no módulo biomassa do CO₂Fix V3.2

Parâmetro	Coefficiente	Fonte
<i>Eucalyptus grandis</i>		
Densidade do plantio (árvores ha ⁻¹)	1.666	Gatto et al. (2011); Santana et al. (2008)
Rotação (anos)	7 e 21	Gatto et al. (2011); Santana et al. (2008); Sella et al. (2008)
Manejo	Celulose e serraria	-
Desbastes (ano)	7 e 12	Oliveira et al. (2008)
Colheita final (ano)	21	-
ICA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Variável com a idade	SisEucalipto
Densidade da madeira (Mg m ⁻³)	0,49	Oliveira (1995)
C na biomassa seca (%)	50	IPCC (2001; 2003)
Turnover folhas	0,69	Stape et al. (2002; 2004)
Turnover galhos	0,31	Stape et al. (2002; 2004)
Turnover raiz	0,18	Couto et al. (2004)
Crescimento relativo de folhas, galhos e raízes (%)	Variável com a idade	Schumacher et al. (2011); Stape et al. (2002); Reis et al. (1985)
<i>Pinus taeda</i>		
Densidade do plantio (árvores ha ⁻¹)	1666	Rodigheri et al. (2002)
Rotação (anos)	21	Rodigheri et al. (2002)
Manejo	Serraria	-
Desbastes (ano)	8 e 12	Rodigheri et al. (2002)
Colheita final (ano)	21	-
ICA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Variável com a idade	SisPinus
Densidade da madeira (Mg m ⁻³)	0,40	Oliveira (1995)
C na biomassa seca (%)	50	IPCC (2001; 2003); Stape et al. (2002; 2004)
Turnover folhas	0,50	Kleinpaul et al.(2003); König et al. (2003); Maserà et al. (2003); Porté et al. (2000)
Turnover galhos	0,10	Kleinpaul et al.(2003); König et al. (2003); Maserà et al. (2003); Porté et al. (2000)
Turnover raiz	0,18	Kleinpaul et al.(2003); König et al. (2003); Maserà et al. (2003); Porté et al. (2000)
Crescimento relativo de folhas, galhos e raízes (%)	Variável com a idade	Schumacher et al.(2002); Balbinot et al. (2003; 2008); Vieira et al. (2011)

2.4.2 Estoque de carbono no solo – Módulo Solos

A contabilização do estoque de carbono no solo no CO₂Fix V.3.1 é realizada de acordo com o modelo Yasso (LISKI et al., 1998, LISKI et al., 2002; LISKI et al., 2005), o qual simula a dinâmica do carbono considerando o efeito das condições climáticas nas taxas de fracionamento e de decomposição do liter. Dados de precipitação anual e a soma da temperatura média anual são requeridos pelo modelo. A partir desses valores é calculada a evapotranspiração potencial. As condições meteorológicas, juntamente com as características do liter depositado sobre o solo, determinam a taxa de decomposição do material no solo. As variáveis temperatura e precipitação anual utilizadas para as simulações em Passo Fundo e em Frederico Westphalen tiveram como referência uma série de dados correspondentes a um

período de 14 anos (1995-2009), provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2010) e constam na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados no módulo solos do Modelo CO₂Fix V3.2 para cenários simulados com *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda*

Parâmetro	Coefficiente	Fonte
Passo Fundo (RS)		
ΣTemperatura anual (°C)	6.763,5	INMET (2010)
Precipitação anual (mm)	1.985,0	INMET (2010)
Evapotranspiração Potencial (mm)	830,9	Calculado CO ₂ Fix
Entrada de C inicial no sistema (MgC ha ⁻¹ ano ⁻¹)	7,5	Dado da pesquisa
Frederico Westphalen (RS)		
ΣTemperatura anual (°C)	7.787,3	INMET (2010)
Precipitação anual (mm)	1.980,0	INMET (2010)
Evapotranspiração Potencial (mm)	1.010,3	Calculado CO ₂ Fix
Entrada de C inicial no sistema (MgC ha ⁻¹ ano ⁻¹)	5,6	Dado da pesquisa

Conforme preconizado por Liski et al. (2005) e Masera et al. (2003), a quantidade inicial de carbono no solo antes da implantação do sistema florestal foi calculada pelo CO₂Fix considerando como fonte os resíduos provenientes do uso atual das terras, que neste caso consiste na biomassa das culturas agrícolas que compõem o sistema de sucessão/rotação de culturas e que permanece na área após a colheita. Para a simulação em Passo Fundo, o valor médio de estoque de carbono no liter foi de 7,5 MgC ha⁻¹ ano⁻¹ e em Frederico Westphalen de 5,6 MgC ha⁻¹ano⁻¹ (Tabela 3). Tais valores foram contabilizados em campo conforme descrito no Capítulo 2 deste trabalho.

Além da quantidade inicial de carbono no liter que entra no sistema, o CO₂Fix contabiliza anualmente o carbono proveniente do “*turnover*” das folhas, galhos e raízes da árvore e do material vegetal que é deixado na área após os desbastes e a colheita final. Este liter é classificado no CO₂Fix em função do material de origem como liter proveniente de material lenhoso (galhos, fuste e raízes grossas) e não lenhoso (folhas e raízes finas), sendo então, dissociado em conteúdo de diferentes classes de compostos orgânicos (extrativos, holocelulose e lignina) (LISKI et al., 2005). As taxas de fracionamento do liter lenhoso e não lenhoso correspondentes aos componentes solúveis, lignina e holocelulose, foram as fornecidas pelo modelo, e se diferenciam para espécies coníferas e lenhosas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Prognose de crescimento e de produção nos cenários florestais gerados pelos programas SisEucalipto e SisPinus

3.1.1 Cenário com *Eucalyptus grandis* para produção de celulose

A prognose de crescimento e de produção de madeira anual no cenário que contempla o plantio de eucalipto para produção de celulose é apresentada na Tabela 4. A produção de madeira do tronco no final da rotação de sete anos foi de 314,2 m³ ha⁻¹ no município de Passo Fundo e de 259,6 m³ ha⁻¹ em Frederico Westphalen.

Tabela 4 – Prognose de crescimento e volume de madeira do sistema florestal com *Eucalyptus grandis* manejado para produção de celulose

Idade (anos)	H (m)	Dm (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	Vol. (m ³ ha ⁻¹)	IMA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	ICA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)
Passo Fundo						
1	3,7	3,5	1,5	2,2	2,2	2,2
2	8,3	9,2	10,5	33,7	16,9	31,5
3	11,8	12,7	19,6	90,4	30,1	56,7
4	14,6	15,0	26,8	152,5	38,1	62,1
5	16,9	16,6	32,2	212,0	42,4	59,5
6	18,8	17,8	36,4	266,0	44,3	54,0
7	20,4	18,8	39,6	314,2	44,9	48,2
Frederico Westphalen						
1	3,3	3,1	1,2	1,5	1,5	1,5
2	7,5	8,4	8,7	25,4	12,7	23,9
3	10,7	11,7	16,9	70,7	23,6	45,3
4	13,2	13,9	23,6	121,9	30,5	51,2
5	15,3	15,5	28,8	171,9	34,4	50,0
6	17,0	16,7	32,9	218,1	36,3	46,2
7	18,5	17,7	36,1	259,6	37,1	41,5

H = Altura média; Dm: diâmetro médio; AB: Área basal; Vol: volume total; IMA= Incremento Médio Anual; ICA = Incremento Corrente Anual.

Valores gerados pelo programa SisEucalipto (OLIVEIRA, 1995).

A produção em termos de volume de madeira aos sete anos de idade em Frederico Westphalen foi cerca de 20% inferior ao estimado em Passo Fundo. A diferença na produção de madeira nos dois locais, obtidas na simulação, é atribuída aos valores do índice de sítio especificado (IS30 em Frederico Westphalen e IS33 em Passo Fundo). Considerou-se que Passo Fundo por haver predominância de LATOSSOLOS VERMELHOS, apresenta melhor

qualidade de sítio para desenvolvimento de espécies florestais, comparativamente ao CAMBISSOLO HÁPLICO, predominante em Frederico Westphalen. Apesar de possuírem boa fertilidade natural, os Cambissolos presentes em Frederico Westphalen são solos menos profundos, com menor capacidade de retenção de água e com presença de pedregosidade. Outro fator considerado foi o maior rendimento da produção agrícola apresentado pelo município de Passo Fundo em relação a Frederico Westphalen, conforme mencionado anteriormente no Capítulo 2.

O maior valor de Incremento Médio Anual (IMA) nos dois municípios ocorreu no sétimo ano, podendo este critério ser utilizado para definir a idade de rotação pela máxima produtividade biológica. Porém, a definição da idade de corte pelo IMA não considera a qualidade da produção, bem como questões econômicas e ambientais. Com relação ao Incremento Corrente Anual (ICA), o máximo valor obtido foi no quarto ano de, respectivamente, 62,1 e 51,2 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ em Passo Fundo e Frederico Westphalen.

Os valores de produção de madeira simulados pelo programa SisEucalipto estão compatíveis com valores obtidos em povoamentos de eucalipto plantados no estado do RS. Schumacher et al. (2011) relatam valor de produção de madeira equivalente a 344,4 m³ ha⁻¹ de *Eucalyptus sp.* aos seis anos de idade, em Vera Cruz no RS. Pavan et al. (2010), em simulações utilizando o SisEucalipto encontraram valores de 342 m³ ha⁻¹ de madeira em plantios de *Eucalyptus grandis*, aos sete anos de idade, manejados para produção de celulose neste mesmo estado. Dossa et al. (2002) ressaltam que uma produção média de eucalipto equivalente a 35 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ pode ser considerada baixa, tendo em vista que existem plantios de eucaliptos melhor adaptados e com uso de boa tecnologia que atingem rendimentos próximos a 60 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. Rodigheri et al. (2005) mencionam valores de produtividade média para o eucalipto, no sul do Brasil, de 40 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e, da mesma forma, resalta que povoamentos bem manejados podem atingir produtividades mais elevadas. Sendo assim, acredita-se que os valores de IMA equivalentes a 44,9 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e 37,1 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ para os Índices de Sítio de maior e menor produtividade, respectivamente, estão compatíveis com os valores de referência para espécie e região. Ademais, prezou-se neste estudo optar por estimativas conservadoras, evitando assim, superestimar os estoques de carbono nos povoamentos.

De acordo com o sortimento da madeira produzida no final dos sete anos para este cenário, cerca de 90% da produção, em ambos os municípios, foi classificada para produção de celulose e 10% para energia.

3.1.2 Cenário com *Eucalyptus grandis* para produção de madeira serrada

Na simulação do cenário considerando o manejo do *Eucalyptus grandis* para a produção de madeira serrada, com rotação de 21 anos e desbastes aos sete e doze anos, obteve-se uma produção total de madeira do tronco de 560,9 m³ ha⁻¹ em Passo Fundo e de 466,9 m³ ha⁻¹ em Frederico Westphalen, incluindo os desbastes (Tabelas 5 e 6). Os valores máximos de IMA foram alcançados no sétimo ano após o plantio (Tabela 5).

Após o primeiro e o segundo desbastes, efetuados no 7^o e 12^o anos, permaneceram no povoamento, respectivamente, em média 825 e 416 árvores por hectare. Esses desbastes proporcionaram a produção de madeira para ser utilizada principalmente em celulose e energia. Ao final dos 21 anos estabeleceu-se o corte das árvores remanescentes no povoamento, onde 83% da madeira colhida foram classificadas para uso em serraria I (Tabela 6).

Os valores de produção de madeira obtidos para o cenário de plantio de *Eucalyptus grandis* manejado para serraria corroboram os valores relatados por Oliveira et al. (2008) no município de Alegrete no RS, que foi de 537 m³ ha⁻¹ em plantios de eucalipto manejados para esta mesma finalidade. No referido estudo, os autores mencionam que 85% da produção foi classificada para uso em serraria e 15% para energia.

Tabela 5 – Prognose de crescimento e volume de madeira do sistema florestal com *Eucalyptus grandis* manejado para serraria

Idade (anos)	Passo Fundo						Frederico Westphalen					
	H (m)	D (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	Vol. (m ³ ha ⁻¹)	IMA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	ICA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	H (m)	D (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	Vol. (m ³ ha ⁻¹)	IMA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	ICA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)
1	3,7	3,5	1,5	2,2	2,2	2,2	3,3	3,1	1,2	1,5	1,5	1,5
2	8,3	9,2	10,5	33,7	16,9	31,5	7,5	8,4	8,7	25,4	12,7	23,9
3	11,8	12,7	19,6	90,4	30,1	56,7	10,7	11,7	16,9	70,7	23,6	45,3
4	14,6	15,0	26,8	152,5	38,1	62,1	13,2	13,9	23,6	121,9	30,5	51,2
5	16,9	16,6	32,2	212,0	42,4	59,5	15,3	15,5	28,8	171,9	34,4	50,0
6	18,8	17,8	36,4	266,0	44,3	54,0	17,0	16,7	32,9	218,1	36,3	46,2
7	20,4	18,8	39,6	314,2	44,9	48,2	18,5	17,7	36,1	259,6	37,1	41,5
Desbaste com remoção de 597 árvores							Desbaste com remoção de 639 árvores					
8	22,8	20,0	26,0	231,3	42,1	23,0	20,6	19,0	23,3	187,1	34,8	18,6
9	24,0	20,8	27,8	260,0	40,7	28,7	21,6	19,8	25,1	211,6	33,6	24,5
10	25,0	21,5	29,3	285,8	39,2	25,8	22,5	20,4	26,6	233,7	32,5	22,1
11	25,9	22,1	30,5	309,0	37,7	23,2	23,4	21,0	27,9	253,7	31,3	20,0
12	26,8	22,6	31,6	329,9	36,3	20,9	24,1	21,5	28,9	271,8	30,2	18,1
Desbaste com remoção de 375 árvores							Desbaste com remoção de 381 árvores					
13	30,8	23,7	18,3	220,2	35,9	31,5	27,9	22,6	16,7	181,7	29,9	26,4
14	31,6	24,3	19,2	237,1	34,6	16,9	28,6	23,2	17,5	195,9	28,8	14,2
15	32,3	24,8	20,1	252,6	33,3	15,5	29,2	23,7	18,3	208,8	27,8	12,9
16	32,8	25,3	20,8	266,5	32,1	13,9	29,6	24,2	19,1	220,3	26,7	11,5
17	33,2	25,7	21,5	278,8	30,9	12,3	30,0	24,6	19,7	230,5	25,8	10,2
18	33,5	26,1	22,2	289,6	29,8	10,8	30,2	25,0	20,3	239,4	24,8	8,9
19	33,7	26,5	22,7	298,8	28,7	9,2	30,3	25,4	20,9	247,0	23,9	7,6
20	33,8	26,8	23,3	306,8	27,7	8,0	30,4	25,7	21,4	253,5	23,1	6,5
21	33,8	27,1	23,8	313,8	26,7	7,0	30,4	26,0	21,9	259,3	22,2	5,8

H: altura média; Dm: diâmetro médio; AB: área basal; Vol.: volume médio; IMA: incremento médio anual; ICA: incremento corrente anual.

Valores gerados pelo SisEucalipto (OLIVEIRA, 1995).

Tabela 6 – Sortimento da madeira de *Eucalyptus grandis* manejado para serraria

Volume de madeira produzido (m ³ ha ⁻¹)										
Passo Fundo						Frederico Westphalen				
Colheita/ Desbaste	Celulose	Energia	Serraria I	Serraria II	Total	Celulose	Energia	Serraria I	Serraria II	Total
7 anos	89,5	11,3	0,0	5,1	105,9	77,1	11,4	0,0	2,6	91,1
12 anos	37,4	5,5	0,0	98,3	141,2	46,7	5,8	0,0	64,0	116,5
21 anos	44,9	7,8	32,5	228,6	313,8	39,6	5,8	13,0	200,6	259,3
Total	171,8	24,6	32,5	332,0	560,9	163,4	23,0	13,0	267,2	466,9

Valores gerados pelo SisPinus. Serraria I: Dm = 25cm e C = 1,35m e Serraria II: Dm = 15cm e C = 2,4m.

3.1.3 Cenário com *Pinus taeda* para produção de madeira serrada

A predição do crescimento e o volume de madeira de *Pinus taeda*, gerados pelo SisPinus nos reflorestamentos simulados para as duas regiões estudadas, são apresentados na Tabela 7.

O volume total de madeira com casca produzido durante a rotação de 21 anos, incluindo os desbastes foi de, respectivamente, 602,8 m³ ha⁻¹ e 540,1 m³ ha⁻¹ em Passo Fundo e em Frederico Westphalen (Tabelas 7 e 8). Os maiores valores de IMA ocorreram no 12^o ano em ambos os cenários (Tabela 7).

Conforme demonstrado na Tabela 8, no primeiro desbaste, efetuado aos oito anos de idade, foram removidas, aproximadamente, 577 árvores ha⁻¹, que proporcionaram uma produção madeireira com 81% classificada para produção de celulose. No segundo desbaste, aos 12 anos de idade, foram removidas cerca de 491 árvores ha⁻¹, sendo que no povoamento em Passo Fundo, 60% da madeira foram classificados para utilização em serraria, 34% para produção de celulose e 6% para energia. No povoamento em Frederico Westphalen, no desbaste aos 12 anos 50% foram classificados para uso em serraria, 45% para produção de celulose e 5% para energia. Ao final dos 21 anos estabeleceu-se o corte das 500 árvores restantes no povoamento em Passo Fundo e em Frederico Westphalen e a produção média de madeira no 21^o ano foi de, respectivamente, 432,5 e 389,9 m³ ha⁻¹ (Tabela 8), onde cerca de 90% foi classificada para uso em serraria.

Tabela 7 – Prognose de crescimento e volume de madeira do sistema florestal com *Pinus taeda* manejado para serraria

Idade (anos)	Passo Fundo						Frederico Westphalen					
	H (m)	D (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	Vol. (m ³ ha ⁻¹)	IMA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	ICA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	H (m)	D (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	Vol. (m ³ ha ⁻¹)	IMA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	ICA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)
1	0,4	0,2	0,3	0,1	0,1	0,0	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0
2	2,1	2,2	0,6	0,6	0,3	0,6	2,0	2,0	0,5	0,5	0,2	0,4
3	4,1	5,5	3,7	6,8	2,3	6,2	3,8	5,1	3,2	5,6	1,9	5,1
4	6,0	8,6	9,1	24,4	6,1	17,6	5,6	8,1	8,1	20,6	5,2	15,0
5	7,7	11,2	15,6	53,7	10,7	29,3	7,3	10,6	14,1	45,9	9,2	25,3
6	9,2	13,3	22,1	91,8	15,3	38,1	8,7	12,7	20,2	79,2	13,2	33,3
7	10,7	15,1	28,3	135,8	19,4	44,0	10,1	14,5	26,0	118,0	16,9	38,8
8	11,9	16,6	34,1	183,1	22,9	47,3	11,3	15,9	31,5	160,1	20,0	42,1
Desbaste com remoção de 577 árvores						Desbaste com remoção de 580 árvores						
9	13,9	19,3	29,2	183,2	25,6	47,4	13,2	18,6	27,0	160,8	22,4	41,8
10	15,0	20,6	33,1	223,5	27,1	40,3	14,2	19,8	30,8	197,0	23,8	36,2
11	16,0	21,7	36,7	263,8	28,3	40,3	15,2	20,9	34,2	233,5	25,0	36,5
12	16,9	22,6	39,9	303,7	29,2	39,9	16,0	21,9	37,4	269,7	25,9	36,2
Desbaste com remoção de 491 árvores						Desbaste com remoção de 494 árvores						
13	18,9	24,8	24,1	204,8	28,9	24,2	18,0	24,0	22,6	182,4	25,6	22,0
14	19,7	26,0	26,6	235,9	29,0	31,1	18,8	25,2	24,9	210,4	25,8	28,0
15	20,5	27,1	28,8	265,9	29,1	30,0	19,5	26,3	27,1	237,4	25,9	27,0
16	21,3	28,0	30,8	295,0	29,1	29,1	20,2	27,2	29,0	263,9	25,9	26,5
17	22,0	28,9	32,7	323,6	29,1	28,6	20,9	28,1	30,8	289,9	25,9	26,0
18	22,7	29,7	34,4	351,7	29,0	28,1	21,5	28,8	32,5	315,4	25,9	25,5
19	23,3	30,4	36,1	379,2	28,9	27,5	22,2	29,6	34,1	340,6	25,8	25,2
20	24,0	31,1	37,6	406,2	28,8	27,0	22,8	30,2	35,7	365,5	25,8	24,9
21	24,6	31,7	39,1	432,5	28,7	26,6	23,4	30,9	37,1	389,9	25,7	24,4

Valores gerados pelo SisPinus (OLIVEIRA, 2011).

H: altura média; D: diâmetro médio; AB: área basal; Vol.: volume médio; IMA: incremento médio anual; ICA: incremento corrente anual.

Tabela 8 – Sortimento da madeira de *Pinus taeda* manejado para serraria

Volume de madeira produzido (m ³ ha ⁻¹)										
Passo Fundo						Frederico Westphalen				
Colheita/ Desbaste	Celulose	Energia	Serraria I	Serraria II	Total	Celulose	Energia	Serraria I	Serraria II	Total
8 anos	38,3	8,1	0,0	0,8	47,2	33,2	7,7	0,0	0,2	41,2
12 anos	41,4	7,4	0,2	74,1	123,1	49,4	5,7	0,0	54,0	109,0
21 anos	31,5	6,0	233,2	161,7	432,5	27,9	6,6	192,4	163,0	389,9
Total	111,2	21,5	233,4	236,6	602,8	110,5	20	192,4	217,2	540,1

Serraria I: Dm = 25cm e Comprimento da tora = 1,35m.

Serraria II: Dm = 15cm e Comprimento da tora = 2,40m.

Estudos realizados por Dossa et al. (2000b) mencionam valor de IMA equivalente a 25 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, para plantios de *Pinus taeda* aos 21 anos, na região do Alto Médio Uruguai. Valor o qual corrobora os resultados encontrados neste estudo. Selle et al. (1994) ressaltam valores de produção obtidos em Cambará do Sul (RS), equivalente a 759 m³ ha⁻¹ para *Pinus taeda* com rotação de 25 anos de idade. Para esta mesma região, Mainard et al. (1996) demonstraram que para índices de sítio variando entre 16 e 28, foram encontrados valores de produção de, respectivamente, 243 a 911 m³ ha⁻¹ em *Pinus taeda* aos 16 anos de idade, sendo que o incremento médio anual nesta idade atingiu 15,23 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, no índice de sítio 16 e 56,94 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ no índice de sítio 28. Considerando os índices de sítio 20 e 22, esses mesmos autores relatam uma produção aos 16 anos de idade de, respectivamente, 388,39 m³ ha⁻¹ e 473,79 m³ ha⁻¹, incluindo os desbastes. Sendo assim, pode-se inferir que embora haja certa variação entre os valores encontrados nos diferentes estudos realizados para esta mesma espécie, os valores de produção de madeira total, obtidos pelo SisPinus para a região de Passo Fundo (602,8 m³ ha⁻¹) e de Frederico Westphalen (540,1 m³ ha⁻¹) estão dentro dos padrões encontrados para o estado.

3.2 Volume de madeira, estoques de biomassa e de carbono estimados pelo CO₂Fix para cenários com *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda*

3.2.1 Cenário com *Eucalyptus grandis* com rotação de sete anos de idade e três ciclos de corte, manejado para celulose

Produção de madeira e biomassa arbórea

As simulações realizadas no CO₂Fix para plantios de *Eucalyptus grandis*, com rotação de sete anos, para os municípios de Passo Fundo e Frederico Westphalen, geraram valores de produção de madeira do tronco, em volume, idênticos aos simulados pelo programa SisEucalipto (Figura 2).

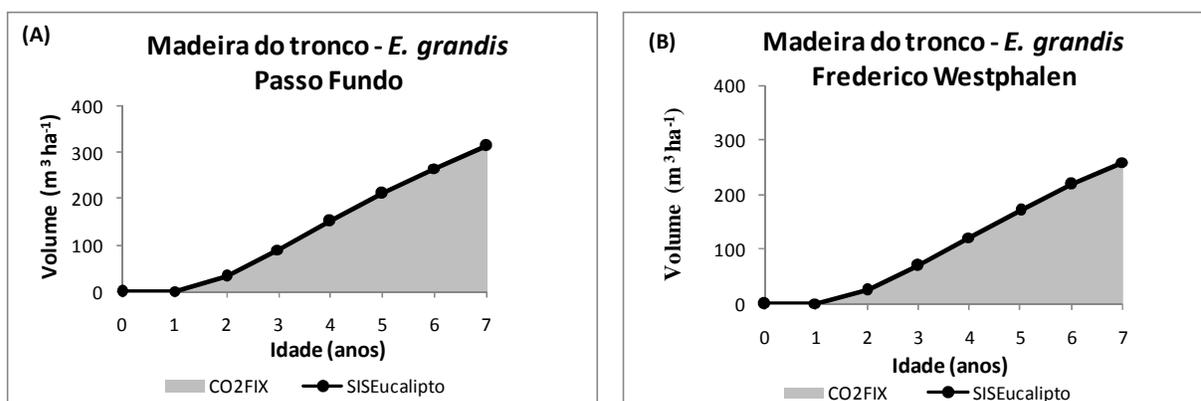


Figura 2 – Produção de madeira do tronco de *Eucalyptus grandis* simulada pelos programas CO₂Fix e SisEucalipto para povoamento em Passo Fundo (A) e Frederico Westphalen (B).

Com relação aos valores de biomassa seca total do *Eucalyptus grandis* simulado pelo CO₂Fix, para o município de Passo Fundo, ao final dos sete anos, o estoque foi de 184,8 Mg ha⁻¹, sendo que 164,1 Mg ha⁻¹ corresponde à biomassa acima do solo (tronco com casca, folhas e galhos) e 20,7 Mg ha⁻¹ à biomassa abaixo do solo (raízes). Já no povoamento em Frederico Westphalen, a biomassa seca total foi de 152,9 Mg ha⁻¹, estando 135,6 Mg ha⁻¹ estocada acima do solo e 17,3 Mg ha⁻¹ nas raízes. Os valores da biomassa total, da biomassa do tronco, das folhas, galhos e raízes da árvore de eucalipto, bem como a participação percentual de cada compartimento na biomassa total são apresentados na Figura 3.

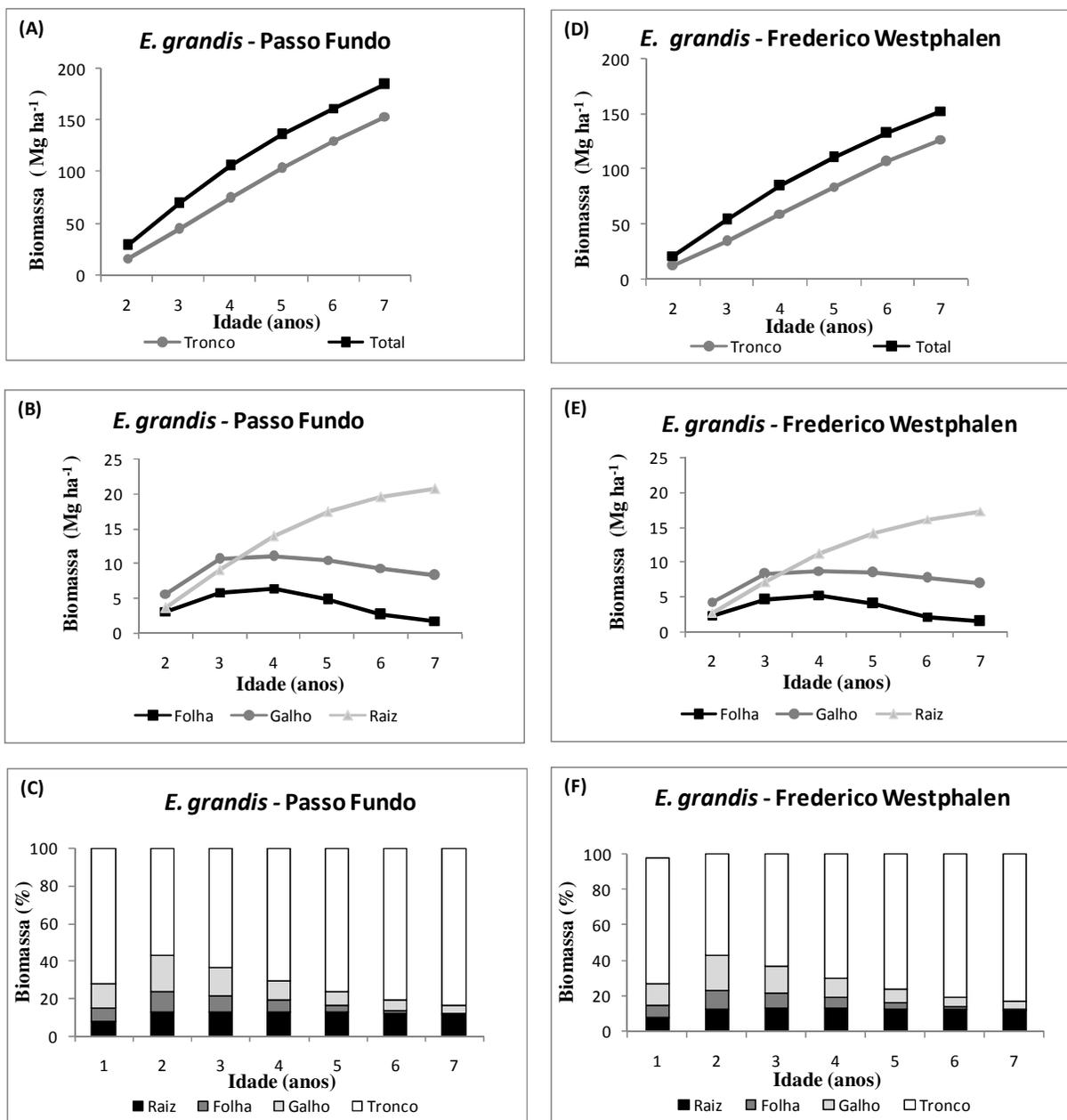


Figura 3 – (A) Biomassa total e biomassa do tronco de *E. grandis* em Passo Fundo; (B) Biomassa das folhas, galhos e raízes *E. grandis* em Passo Fundo; (C) Percentual de biomassa nos compartimentos raiz, folha, galho e tronco de *E. grandis* em Passo Fundo; (D) Biomassa total e biomassa do tronco de *E. grandis* em Frederico Westphalen; (E) Biomassa das folhas, galhos e raízes de *E. grandis* em Frederico Westphalen; (F) Percentual de biomassa nos compartimentos raiz, folha, galho e tronco de *E. grandis* em Frederico Westphalen.

Dentre os compartimentos arbóreos, o tronco foi o que apresentou maior acúmulo de biomassa ao final dos sete anos, seguido pelas raízes, galhos e folhas. Os valores de biomassa

simulados para os dois municípios apresentaram comportamentos semelhantes com relação à distribuição e ao incremento nos compartimentos da árvore.

De acordo com as Figuras 3A, 3B, 3D e 3E observa-se que o incremento da biomassa do tronco foi crescente até o final do ciclo, enquanto que a biomassa das raízes apresentou tendência à estabilização por volta dos 6 anos de idade. Nas folhas e nos galhos essa estabilização, e posterior queda, iniciam-se por volta do terceiro ao quarto ano. Segundo estudos realizados por Reis et al. (1985), onde são relatados decréscimos nos valores de incremento da biomassa foliar a partir do terceiro ano após o plantio, isso ocorre, possivelmente, em virtude de um desequilíbrio entre produção e morte de folhas, devido à redução da disponibilidade de nutrientes no solo, após cessar o efeito da fertilização inicial da área. Outro fator interveniente é a redução da entrada de luz no povoamento.

Considerando apenas os valores de biomassa acima do solo do *Eucalyptus grandis* ao final do período de rotação de sete anos (164,0 Mg ha⁻¹ em Passo Fundo e 135,6 Mg ha⁻¹ em Frederico Westphalen) verifica-se que estes estão dentro da faixa de valores encontrados para esta faixa etária, em povoamentos plantados no RS e em outros locais do Brasil. Santana et al. (2008), por exemplo, mencionam valores de biomassa seca acima do solo em eucalipto na região da Depressão Central no RS variando de 157,4 Mg ha⁻¹ aos sete anos a 220,7 Mg ha⁻¹ aos 11 anos de idade ou, ainda, de 171,4 a 267,5 Mg ha⁻¹, respectivamente, para as mesmas idades, mas na região do Litoral Norte, no estado do Espírito Santo. Schumacher et al. (2002) relataram valores de 83,2 Mg ha⁻¹ aos quatro anos de idade, em povoamentos de *E. globulus* em Butiá, RS e Freitas et al. (2004) mencionam um estoque de biomassa de 142,3 Mg ha⁻¹ aos nove anos em Alegrete, RS. Quando considerados os valores de biomassa acima e abaixo do solo aos sete anos de idade (184,8 Mg ha⁻¹ em Passo Fundo e 152,9 Mg ha⁻¹ em Frederico Westphalen), estes foram concordantes com os valores relatados por Gatto et al. (2011), os quais variaram entre 144,9 e 198,3 Mg ha⁻¹ em plantios de *Eucalyptus sp.* nesta mesma idade na região Centro-Leste de MG.

Com relação à distribuição da biomassa nos compartimentos da árvore em função da idade (Figuras 3C e 3F), observa-se que os percentuais nos compartimentos galhos, folhas e raízes foram maiores nos primeiros anos do plantio e sofreram decréscimo no decorrer dos anos, enquanto que, os percentuais nos compartimentos tronco e raiz aumentaram com a idade. No sétimo ano, a biomassa do tronco foi equivalente a 83% da biomassa arbórea total,

a biomassa das raízes 11%, dos galhos 4,5% e das folhas 1,5%. Essa mesma tendência na distribuição da biomassa nos compartimentos do eucalipto também foi verificada e relatada por Couto et al. (2004), Gatto et al. (2011), Pereira et al. (1984) e Schumacher et al. (2011). Segundo Schumacher et al. (2011), povoamentos de *Eucalyptus* sp. em Vera Cruz (RS) com seis anos de idade apresentaram 80% da biomassa seca alocada no tronco, 10% na raiz, 7% nos galhos e 3% nas folhas.

De acordo com Gonçalves et al. (2000), a explicação para o comportamento da distribuição de biomassa nos diferentes compartimentos, ao longo do desenvolvimento dos povoamentos florestais, está nas fases nutricionais das árvores. Na primeira delas, antes do fechamento das copas e após a adaptação ao campo, ocorre um período de crescimento intenso no qual a maior parte dos fotoassimilados sintetizados pela planta é canalizada para a formação da copa (expansão da área foliar) e sistema radicular. Nessa fase, as raízes exploram parcialmente o volume de solo e as árvores não competem entre si por fatores de crescimento (luz, água, nutrientes), sendo o seu crescimento limitado pelas suas próprias condições fisiológicas. A segunda fase se dá a partir do fechamento das copas das árvores, quando o acúmulo de nutrientes ocorre com mais intensidade nos troncos, uma vez que a formação de copa atinge uma fase de relativa estabilidade. Schumacher et al. (2011) mencionam ainda que a idade, a espécie, a fertilidade do solo e a densidade de plantio são fatores que também afetam a distribuição percentual da biomassa dos componentes arbóreos. Abrahamson e Gadgil (1973) ressaltam que a distribuição da biomassa nos diferentes órgãos da planta pode variar de espécie para espécie e até mesmo em uma população da mesma espécie.

Considerando a rotação de sete anos de idade com três ciclos de corte, aos 7, 14 e 21 anos, foi simulado, então, um cenário com horizonte de planejamento de 21 anos, incluindo uma queda de 10% na produtividade de madeira e na produção de biomassa arbórea a partir da segunda rotação. O comportamento no incremento de biomassa seca acima e abaixo do solo simulados pelo CO₂Fix para este cenário, bem como a participação percentual de biomassa de cada compartimento da árvore de *Eucalyptus grandis* em Passo Fundo e em Frederico Westphalen, foram semelhantes para as três rotações conforme apresentado na Figura 4.

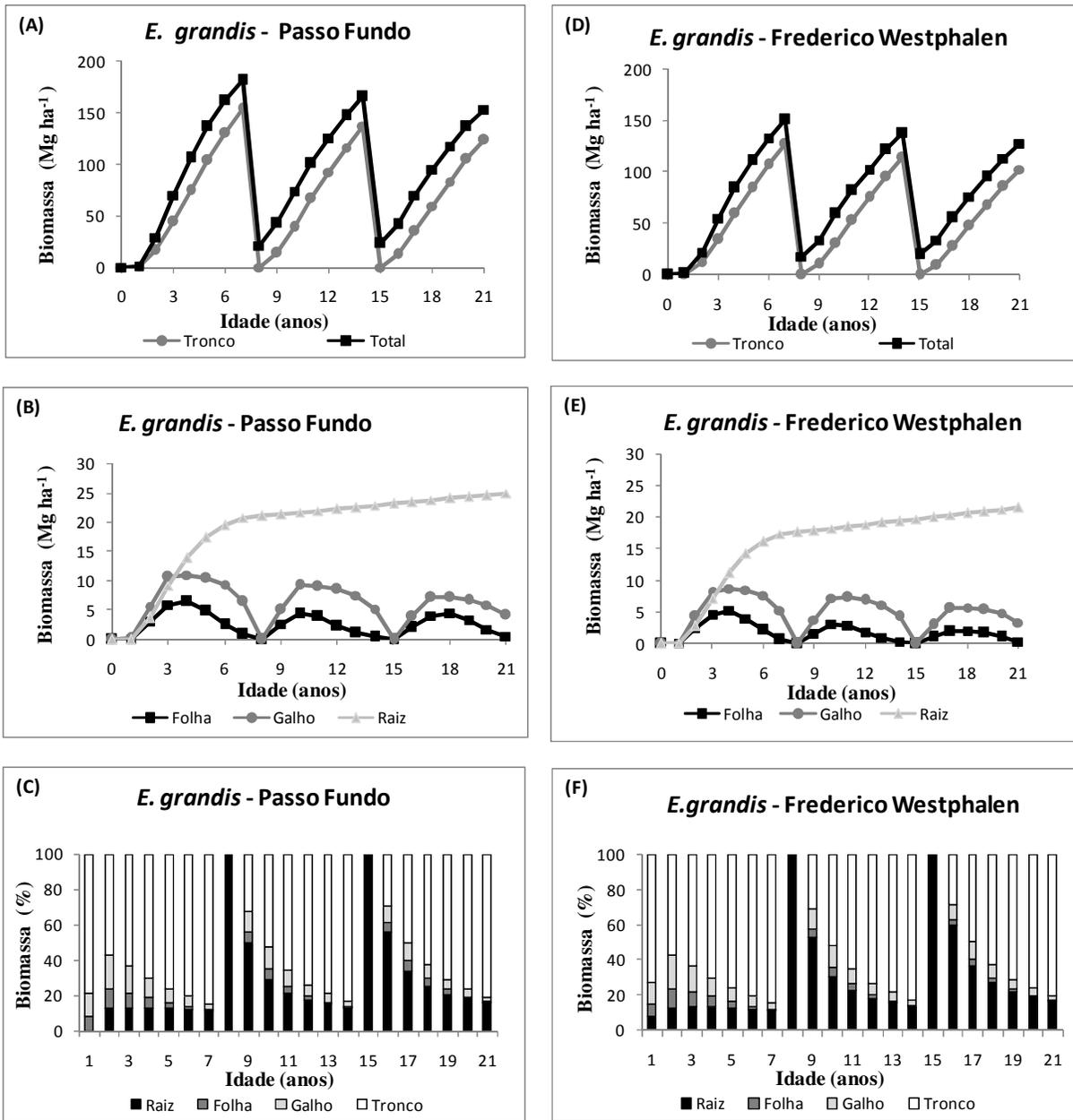


Figura 4 – (A) Biomassa total e biomassa do tronco de *E. grandis* em Passo Fundo; (B) Biomassa das folhas, galhos e raízes *E. grandis* em Passo Fundo; (C) Percentual de biomassa nos compartimentos raiz, folha, galho e tronco de *E. grandis* em Passo Fundo; (D) Biomassa total e biomassa do tronco de *E. grandis* em Frederico Westphalen; (E) Biomassa das folhas, galhos e raízes *E. grandis* em Frederico Westphalen; (F) Percentual de biomassa nos compartimentos raiz, folha, galho e tronco de *E. grandis* em Frederico Westphalen, RS.

Estoques de carbono na biomassa e no solo

Ao final do primeiro período de rotação de sete anos, o estoque de carbono acima e abaixo do solo estimado pelo CO₂Fix no povoamento de eucalipto foi de 92,4 MgC ha⁻¹ em Passo Fundo e de 76,5 MgC ha⁻¹ em Frederico Westphalen (Figuras 5A e 5B). Gatto et al. (2011) relatam para esta mesma idade e densidade de plantio, variações entre 73,2 e 106,1 MgC ha⁻¹ em povoamentos de *Eucalyptus* sp. implantados na região Centro Leste de MG. Enquanto Santana et al. (2008) estimaram um estoque de carbono acima do solo equivalente a 74,2 MgC ha⁻¹ em povoamentos de eucalipto, aos sete anos de idade, implantados na região da Depressão Central do RS.

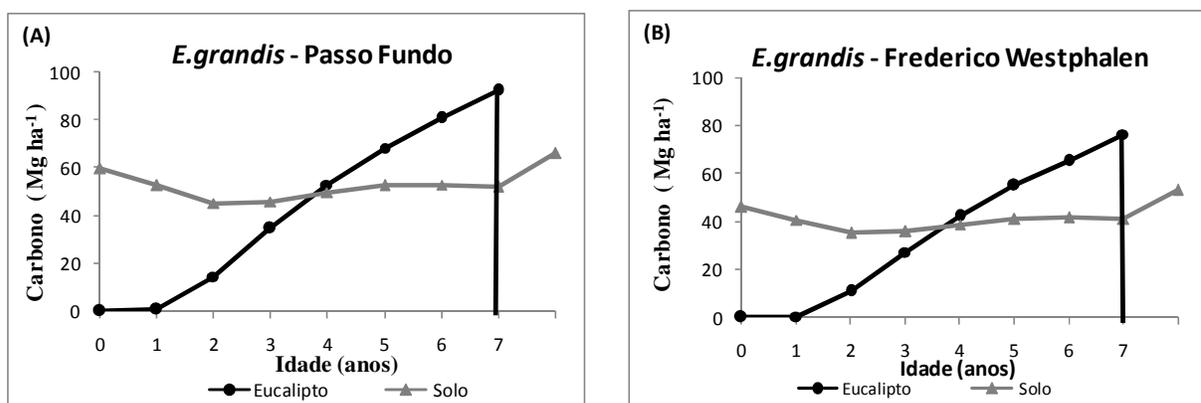


Figura 5 - Estoque de carbono na biomassa arbórea e no solo nos povoamentos de *Eucalyptus grandis*, com rotação de sete anos de idade, em Passo Fundo (A) e em Frederico Westphalen (B).

Conforme Figuras 5A e 5B, os estoques iniciais de carbono no solo, promovidos pela cultura agrícola existente na área, antes da implantação do povoamento florestal simulado pelo CO₂Fix, foram de, respectivamente, 59,8 MgC ha⁻¹ em Passo Fundo e 46,1 MgC ha⁻¹ em Frederico Westphalen. No primeiro caso, o estoque foi 8% inferior ao valor médio de 64,8 MgC ha⁻¹ mensurado até a profundidade de 30cm, em uma área de LATOSSOLO VERMELHO cultivado com sistema de rotação de grãos manejado sob sistema plantio direto em Passo Fundo, conforme dados do capítulo 2 deste trabalho. Para a simulação em Frederico Westphalen, o valor obtido ficou entre as médias dos valores mensurados em área de LATOSSOLO VERMELHO (50,1 MgC ha⁻¹) e de CAMBISSOLO HÁPLICO (33,9 MgC ha⁻¹), conforme capítulo 2. As diferenças entre os estoques iniciais de carbono no solo das duas simulações podem ser atribuídas à quantidade e à qualidade da biomassa dos sistemas

agrícolas, que atuam como entrada de liter no sistema, e também, às diferenças das variáveis climáticas (precipitação e temperatura) que influenciam na taxa de decomposição e são computadas pelo modelo CO₂Fix. Neste caso, pode-se inferir que a quantidade e qualidade do liter tendem a apresentar contribuições maiores para essas diferenças do que as diferenças nas condições climáticas, tendo em vista que tais condições, nos dois municípios foco deste estudo, são bastante semelhantes.

A partir do segundo ano após a implantação do povoamento de eucalipto observa-se um ligeiro acréscimo com tendência à estabilização no estoque de carbono do solo até o final do período de rotação de sete anos. Os estoques de carbono ao final dos sete anos, antes de efetuar a colheita das árvores foram de, respectivamente, 51,9 MgC ha⁻¹ e 40,9 MgC ha⁻¹ para as simulações em Passo Fundo e em Frederico Westphalen. Verifica-se que tais valores foram inferiores aos estimados inicialmente nos sistemas, entretanto, quando efetuada a simulação do corte raso do povoamento aos sete anos, verificou-se que o estoque de carbono no solo atingiu valores superiores aos estoques iniciais, de 66,2 MgC ha⁻¹ em Passo Fundo e 53,0 MgC ha⁻¹ em Frederico Westphalen. O aumento do estoque de carbono no solo ao final do período de rotação ocorre, principalmente, devido ao incremento na quantidade de resíduos da colheita, que serão, posteriormente, decompostos e incorporados em forma de matéria orgânica, e conseqüentemente de carbono. Ainda, com relação ao estoque de carbono no solo promovido por este cenário, pode-se inferir que a tendência de queda nos primeiros anos após a implantação do reflorestamento e de estabilização por volta dos sete anos de idade, são indicativos que a colheita efetuada nesta idade pode ser uma boa prática de manejo para maximizar o estoque de carbono no solo.

Quando simulado o cenário considerando as três rotações de sete anos e ciclo final aos 21 (Figura 6), o povoamento com plantio inicial de 1.666 árvores por hectare de *Eucalyptus grandis* promoveu uma estocagem temporária de carbono na biomassa arbórea equivalente a 250,6 MgC ha⁻¹ na simulação para Passo Fundo, o que corresponde a um incremento médio anual de carbono de 12,0 MgC ha⁻¹ ano⁻¹. Para a simulação em Frederico Westphalen, o estoque foi de 207,9 MgC ha⁻¹, com IMA de 10,0 MgC ha⁻¹ ano⁻¹. Já os estoques de carbono no solo no final da rotação de 21 anos foram inferiores àqueles estimados no início da primeira rotação, correspondendo à 56,0 MgC ha⁻¹ e 44,5 MgC ha⁻¹ em Passo Fundo e Frederico Westphalen, respectivamente.

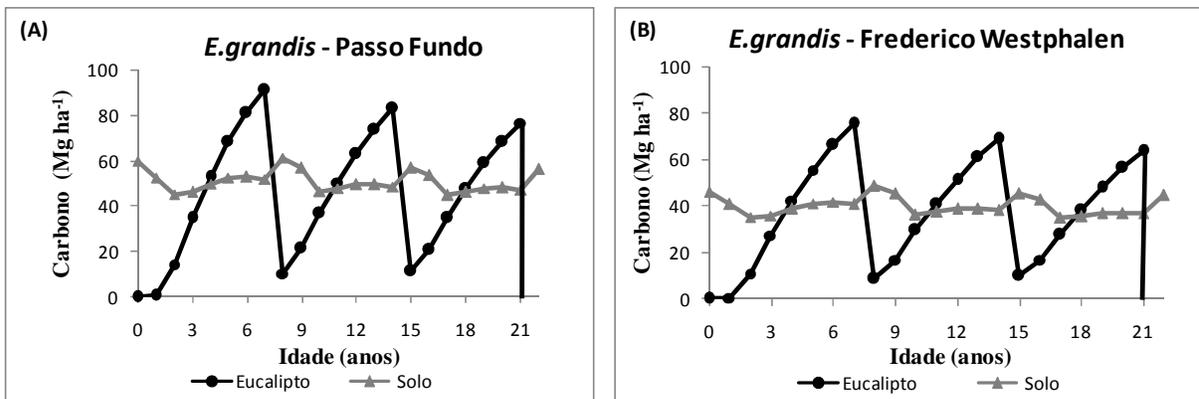


Figura 6 – Estoque de carbono na biomassa arbórea e no solo nos povoamento de *Eucalyptus grandis* com rotação de sete anos e três ciclos de corte em Passo Fundo (A) e em Frederico Westphalen (B), RS.

De acordo com as Figuras 6(A) e 6(B), nos primeiros anos após a implantação do povoamento de eucalipto, ocorrem quedas no estoque de carbono do solo, comparativamente ao estoque existente inicialmente. Conforme já mencionado, isso ocorre devido ao alto potencial de incorporação de matéria orgânica e de carbono no solo, promovido pelo sistema plantio direto, o qual foi considerado como entrada inicial de liter no sistema. Contudo, após a adaptação da cultura em campo, os plantios de eucalipto são caracterizados por altos valores de ICA, e conseqüentemente, o *turnover* das folhas, galhos e raízes proporcionará quantidades elevadas de liter, e o estoque de carbono tende a ser crescente. Ao final de cada rotação, observa-se também um ligeiro aumento no estoque de carbono do solo, visto que há maior acúmulo de liter, proveniente dos resíduos da colheita. Segundo Nabuurs e Schelhaas (2002), nos primeiros anos de uma floresta recentemente estabelecida, a produção de liter muitas vezes não é suficiente para equilibrar a decomposição do estoque de carbono do solo e, durante alguns anos, a redução líquida de carbono neste compartimento pode ser maior que o incremento da biomassa arbórea, podendo ocasionar assim um saldo negativo, em termos de estocagem de carbono.

3.2.2 Cenário com *Eucalyptus grandis* com rotação de 21 anos, manejado para serraria

Produção de madeira e biomassa arbórea

As simulações geradas pelo CO₂Fix para os plantios de *Eucalyptus grandis* manejado para serraria, com rotação de 21 anos e desbastes no sétimo e décimo-segundo anos, geraram valores de produção de madeira do tronco semelhantes aos simulados pelo programa SisEucalipto (Figuras 7(A) e 7(B)).

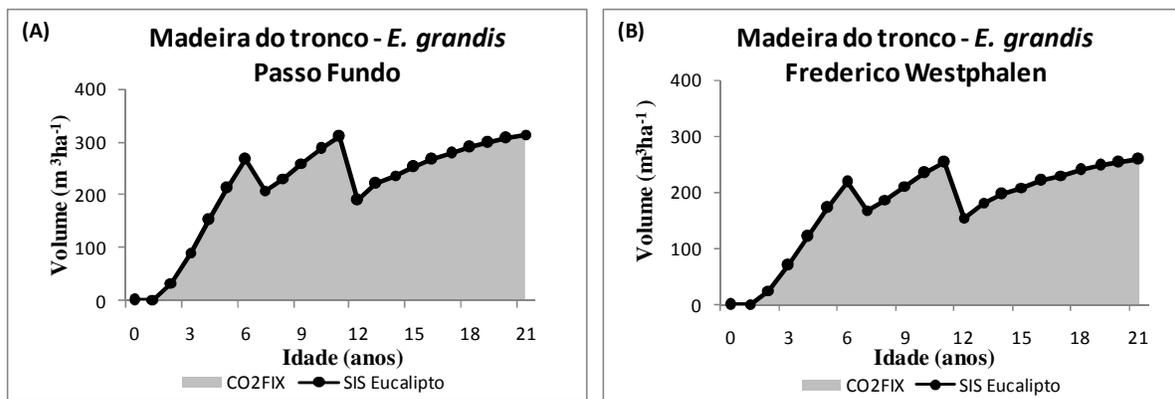


Figura 7 – Produção de madeira do tronco de *Eucalyptus grandis* simulada pelos softwares CO₂Fix e SisEucalipto para povoamento em Passo Fundo (A) e Frederico Westphalen (B).

Até o sétimo ano, os valores foram idênticos. Entretanto, a partir da realização do primeiro desbaste, os valores gerados pelo CO₂Fix foram cerca de 1% superiores aos do SisEucalipto. Essa diferença de volume de madeira produzido entre os dois modelos pode ter ocorrido devido às correções nos valores do incremento corrente anual (utilizado como dado de entrada do CO₂Fix) nos anos em que ocorreram os desbastes.

De acordo com os valores gerados pelo CO₂Fix, a biomassa arbórea total do *Eucalyptus grandis* no vigésimo-primeiro ano em Passo Fundo, descontando os valores dos desbastes, foi de 163,4 Mg ha⁻¹, sendo que 157,4 Mg ha⁻¹ correspondeu à biomassa acima do solo (tronco com casca, folhas e galhos) e 6,0 Mg ha⁻¹ à biomassa abaixo do solo (raízes) (Figura 8). O povoamento em Frederico Westphalen apresentou uma quantidade de biomassa seca inferior, equivalente a 134,7 Mg ha⁻¹, sendo 129,4 Mg ha⁻¹ estocada acima do solo e 5,3 Mg ha⁻¹ nas raízes (Figura 8). Os valores de biomassa seca acima e abaixo do solo simulados pelo CO₂Fix, bem como a participação percentual de cada compartimento da árvore no período de 21 anos, nos povoamentos de *Eucalyptus grandis* são apresentados na Figura 8.

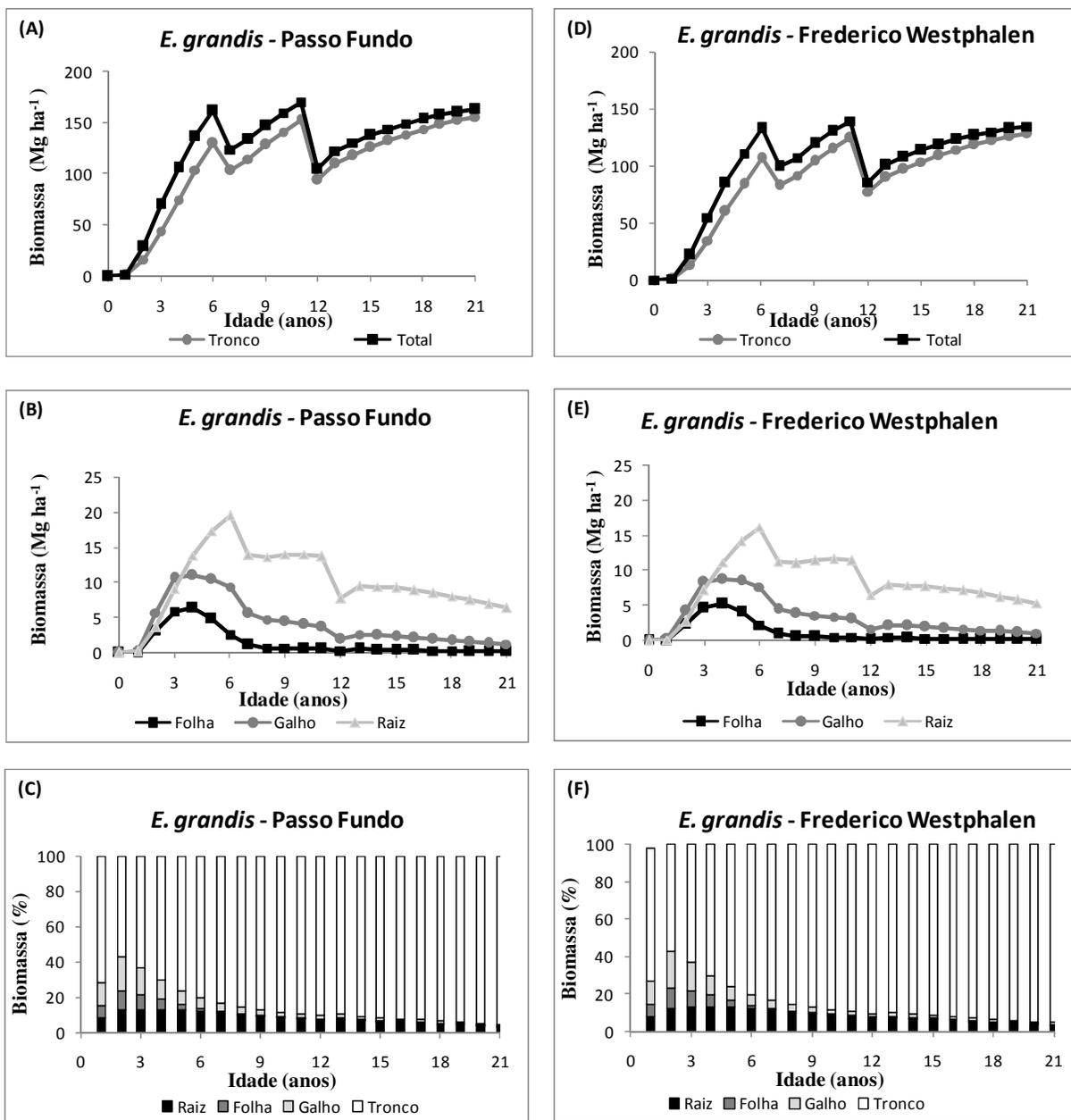


Figura 8 – (A) Biomassa total e biomassa do tronco de *E. grandis* em Passo Fundo; (B) Biomassa das folhas, galhos e raízes *E. grandis* em Passo Fundo; (C) Percentual de biomassa nos compartimentos raiz, folha, galho e tronco de *E. grandis* em Passo Fundo; (D) Biomassa total e biomassa do tronco de *E. grandis* em Frederico Westphalen; (E) Biomassa das folhas, galhos e raízes *E. grandis* em Frederico Westphalen; (F) Percentual de biomassa nos compartimentos raiz, folha, galho e tronco de *E. grandis* em Frederico Westphalen.

Ao final do período de rotação, verificou-se que o tronco foi o compartimento que apresentou maior acúmulo de biomassa, equivalente a 155,6 Mg ha⁻¹ no povoamento de Passo Fundo e 128,2 Mg ha⁻¹ em Frederico Westphalen. Tais valores foram inferiores ao valor

mencionado por Oliveira et al. (2008) para plantios de *Eucalyptus grandis* em Alegrete (RS) aos 21 anos de idade, que foi de 197,6 Mg ha⁻¹.

Com o aumento da idade do povoamento, observa-se o aumento do percentual da biomassa do tronco e a redução do percentual de biomassa das folhas, galhos e raiz em relação à biomassa total. Este constitui um comportamento típico para povoamentos florestais de longa rotação, conforme comentado anteriormente. No caso da rotação de 21 anos, o sistema de manejo adotado favorece ainda o ganho de biomassa do tronco, reduzindo assim a contribuição percentual dos outros compartimentos com relação à biomassa total da árvore.

Ao final do período de rotação a biomassa do tronco respondeu por 94% da biomassa total da árvore. As raízes representaram cerca de 4%, seguidas pelos galhos e folhas os quais somaram 2%. Percentuais semelhantes são relatados por Wink (2009) para povoamento de *Eucalyptus* sp. aos 20 anos de idade na região da Depressão Central (RS), onde 95% da biomassa encontrou-se estocada no tronco com casca, 3,4% nos galhos e 1,3% nas folhas. Ainda, com relação à partição da biomassa nos compartimentos do eucalipto, estudos realizados por Couto et al. (2004) em povoamentos de eucalipto híbrido aos 11 anos de idade, relatam que 71% da biomassa nesta idade correspondem ao tronco, 7% à casca e galho, 7,5% à raiz e 0,5% às folhas.

Estoques de carbono na biomassa arbórea e no solo

De acordo com os resultados obtidos pela simulação do CO₂Fix, o cenário considerando o plantio de 1.666 árvores de *Eucalyptus grandis* por hectare promoverá, durante o período de rotação de 21 anos, um estoque de carbono arbóreo de, respectivamente, 157,0 MgC ha⁻¹ e 130,9 MgC ha⁻¹ em Passo Fundo e Frederico Westphalen (Tabela 9). Na realização do primeiro e do segundo desbastes, verifica-se que para as duas simulações 75% e 84% do carbono são exportados da área, via colheita da madeira, permanecendo o restante do material sobre o solo, sendo, posteriormente, decomposto e incorporado ao solo em forma de carbono. Já na colheita final cerca de 94% do carbono é removido da área em forma de madeira comercial (Tabela 9).

Tabela 9 – Estoque de carbono nos compartimentos arbóreos e totais removidos e remanescentes após os desbastes e a colheita final do povoamento de *Eucalyptus grandis*

Desbastes e colheita	Estoque de Carbono (MgC ha ⁻¹)					Removido da área	Fica na área
	Tronco	Galho	Folha	Raiz	Total		
Passo Fundo							
1° desbaste (7 anos)	25,4	2,8	1,2	5,2	34,6	25,4	9,2
2° desbaste (12 anos)	34,2	1,3	0,3	4,0	39,8	34,2	5,6
Colheita final (21 anos)	77,8	0,8	0,1	3,8	82,6	77,8	4,8
Total	137,4	4,9	1,6	13,0	157,0	137,4	19,6
Frederico Westphalen							
1° desbaste (7 anos)	22,3	2,4	1,0	4,5	30,1	22,3	7,9
2° desbaste (12 anos)	28,0	1,1	0,2	3,4	32,7	28,0	4,7
Colheita final (21 anos)	64,1	0,7	0,1	3,2	68,1	64,1	4,0
Total	114,4	4,2	1,4	11,0	130,9	114,4	16,5

Valores gerados pelo CO₂Fix.

Considerando apenas o carbono estocado no compartimento tronco durante o período de rotação de 21 anos, os valores foram equivalentes a 137,4 MgC ha⁻¹ em Passo Fundo e 114,4 MgC ha⁻¹ em Frederico Westphalen. Estudos realizados por Oliveira et al. (2008) relatam um estoque de 98,80 MgC ha⁻¹ para esta mesma espécie em povoamentos implantados no município de Alegrete (RS), cujo período de rotação, densidade de plantio e práticas de manejo são semelhantes ao deste estudo.

Observa-se nas Figuras 9(A) e 9(B) que os dois povoamentos apresentam alto incremento no estoque de carbono arbóreo nos primeiros anos do plantio, queda nos anos de ocorrência dos desbastes e, após o segundo desbaste (12° ano), o incremento anual de carbono é reduzido e tende a se estabilizar à medida que o povoamento atinge a maturidade. Já, a variação do estoque de carbono no solo é proporcional ao fornecimento de liter, seja este liter proveniente do *turnover* das folhas, galhos e raízes ou das práticas de desbastes e da colheita final.

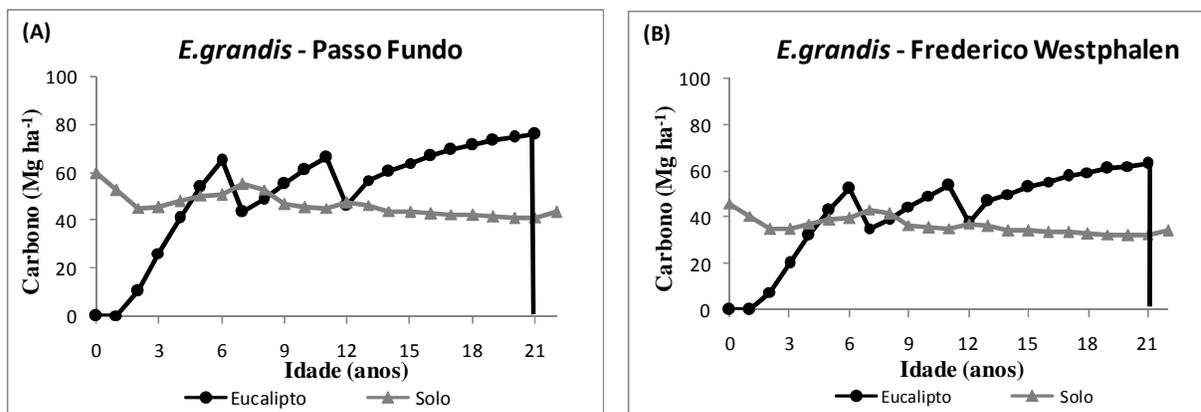


Figura 9 - Estoque de carbono na biomassa arbórea e no solo nos povoamento de *Eucalyptus grandis* em Passo Fundo (A) e em Frederico Westphalen (B).

Os estoques de carbono no solo ao final dos 21 anos foram de 44,3 MgC ha⁻¹ em Passo Fundo e de 35,1 MgC ha⁻¹ em Frederico Westphalen. Esses estoques foram inferiores àqueles estimados após o primeiro e o segundo desbaste e, também, aos estimados antes da implantação do sistema florestal, nas duas áreas de estudo (Figuras 9(A) e 9(B)). Essa estabilização e a tendência à queda do estoque de carbono no solo, à medida que o povoamento de eucalipto vai atingindo a maturidade, pode estar associada à queda da produção de liter, pois a biomassa das folhas e galhos tende a diminuir com idade, e consequentemente o *turnover* desses compartimentos será menor. Tal comportamento também foi relatado por Lemma et al. (2007) em estudos de quantificação de carbono no solo em povoamentos de *Eucalyptus grandis* no sudoeste da Etiópia usando o modelo CO₂Fix.

Os estoques de carbono no solo estimados no final dos 21 anos foram inferiores ao estoque de carbono mensurado em um povoamento de eucalipto não desbastado, com mais de 20 anos de idade, em Passo Fundo, que foi de 56,50 MgC ha⁻¹ até a profundidade de 30 cm de solo (dado não publicado). Ainda, neste mesmo município e para esta mesma profundidade, foi quantificado um estoque de carbono no solo equivalente a 60,83 MgC ha⁻¹ em uma área de floresta nativa. No município de Frederico Westphalen também em um remanescente de mata nativa da região foi quantificado um estoque de 49,51 MgC ha⁻¹ (dados não publicados).

Os valores simulados pelo CO₂Fix demonstram que o estoque de carbono no solo, no decorrer dos 21 anos, está diretamente relacionado à quantidade de liter, ou de carbono proveniente do liter que é incorporado anualmente no sistema. O incremento em termos de

estoque de carbono no solo proporcionado pelo material deixado na área após o primeiro desbaste foi de 9%, após o segundo desbaste de 5% e na colheita final cerca de 8%. Por outro lado verifica-se que, no caso deste cenário, o qual contempla um período de longa rotação e colheita final de aproximadamente 400 árvores por hectare, houve decréscimo do estoque de carbono no solo, comparativamente ao estoque inicial e ao estoque de carbono no solo do cenário que contempla o plantio de eucalipto com três rotações de sete anos, manejado para celulose. Essa diferença pode ser atribuída ao IMA do eucalipto, que é maior nos primeiros anos do período de rotação, atinge o ápice por volta dos 7 anos e tende a cair a medida que o povoamento atinge a maturidade; e também ao maior fornecimento de liter que ocorre a cada sete anos, quando se efetua a colheita. De acordo com Liski et al. (2001) o estoque de carbono nas árvores tende a aumentar com o aumento do período de rotação, mas isso, não necessariamente ocorre com o estoque de carbono do solo. Para Kaipainen et al. (2004) a escolha de período de rotação é considerado um eficaz método de manejo florestal para controlar tanto a qualidade da madeira colhida quanto os estoques de carbono na biomassa arbórea e no solo de um povoamento florestal.

3.2.3 Cenário com *Pinus taeda* com rotação de 21 anos manejado para serraria

Produção de madeira e biomassa arbórea

Os valores de produção de madeira do tronco simulados pelo CO₂Fix nos povoamentos de *Pinus taeda*, com desbastes no oitavo e décimo-segundo anos, e corte final aos 21 anos foram praticamente idênticos aos valores simulados pelo programa SisPinus até o oitavo ano. Diferenças de 4 a 6% nos valores de produção anual de madeira foram observadas nos resultados gerados pelos dois modelos, a partir do ano em que ocorreu o primeiro desbaste (Figuras 10(A) e 10(B)).

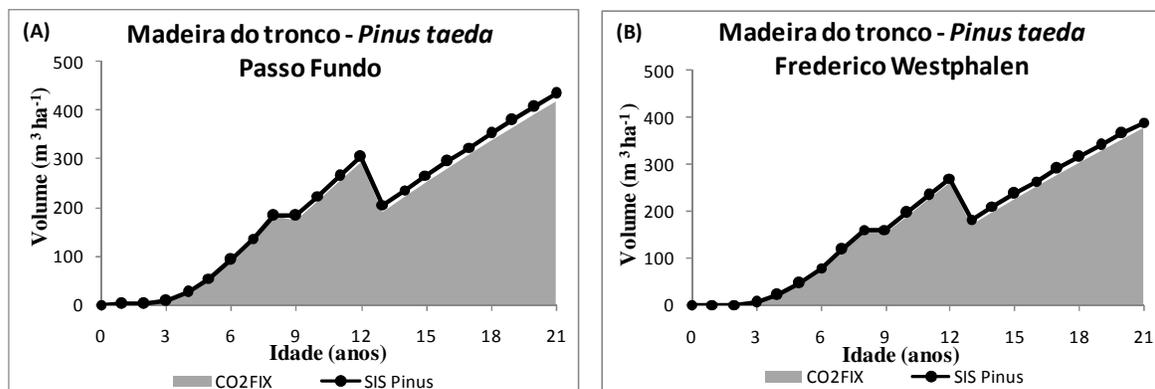


Figura 10 – Produção de madeira do tronco de *Pinus taeda* simulada pelos softwares CO₂Fix e SisPinus para povoamento em Passo Fundo (A) e em Frederico Westphalen (B), RS.

Com relação à biomassa arbórea total do *Pinus taeda* aos 21 anos em Passo Fundo, descontando os valores dos desbastes, essa foi equivalente a 201,2 Mg ha⁻¹, sendo que 190,0 Mg ha⁻¹ corresponderam à biomassa acima do solo (tronco com casca, folhas e galhos) e 10,2 Mg ha⁻¹ à biomassa abaixo do solo (raízes). Já o povoamento simulado para Frederico Westphalen apresentou estoque de biomassa seca de 181,4 Mg ha⁻¹, estando 172,1 Mg ha⁻¹ estocadas acima do solo e 9,3 Mg ha⁻¹ nas raízes. Os valores de biomassa seca acima e abaixo do solo simulados pelo CO₂Fix, bem como a distribuição percentual em cada compartimento da árvore no decorrer dos 21 anos são demonstrados na Figura 11.

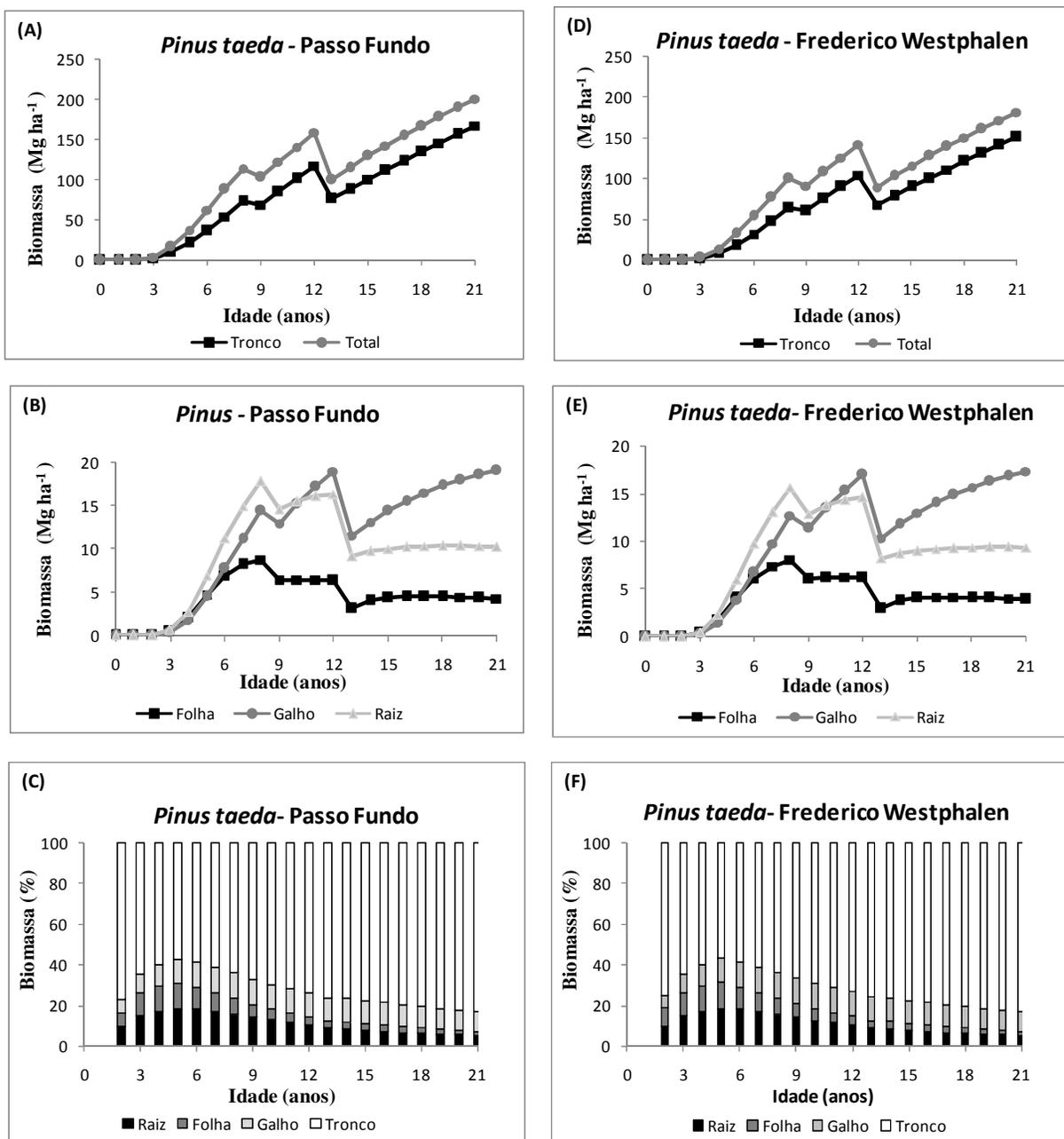


Figura 11 – (A) Biomassa total e biomassa do tronco de *Pinus taeda* em Passo Fundo; (B) Biomassa das folhas, galhos e raízes *Pinus taeda* em Passo Fundo; (C) Percentual de biomassa nos compartimentos raiz, folha, galho e tronco de *Pinus taeda* em Passo Fundo; (D) Biomassa total e biomassa do tronco de *Pinus taeda* em Frederico Westphalen; (E) Biomassa das folhas, galhos e raízes *Pinus taeda* em Frederico Westphalen; (F) Percentual de biomassa nos compartimentos raiz, folha, galho e tronco de *Pinus taeda* em Frederico Westphalen.

Os valores de biomassa total aos 21 anos de idade estimados pelo modelo CO₂Fix foram inferiores aos relatados por Schumacher et al. (2002) e por Bizon (2005) em idades semelhantes. Schumacher et al. (2002), estudando povoamentos de *Pinus taeda* com 20 anos

de idade, na região de Cambará do Sul, encontraram um estoque de biomassa total equivalente a 301,1 Mg ha⁻¹ para este mesmo tipo de manejo e densidade de árvores por hectare. Deste total, 264,0 Mg ha⁻¹ encontravam-se estocados nos compartimentos acima do solo e 37,1 Mg ha⁻¹ nas raízes. Bizon (2005) relatam valores de 253,1 Mg ha⁻¹ em povoamentos aos 19 anos de idade, no estado do Paraná, onde 204,9 Mg ha⁻¹ estavam estocados acima do solo e 48,2 Mg ha⁻¹ nas raízes. Por outro lado, quando analisados os estoques de biomassa nas idades de 5 e 10 anos, que foram de, respectivamente, 37,7 e 122,5 Mg ha⁻¹ para a simulação em Passo Fundo e de 32,3 e 118,4 Mg ha⁻¹ em Frederico Westphalen, os valores nessas idades apresentaram maiores semelhanças aos relatados por Schumacher et al. (2002), que foi de 41,3 Mg ha⁻¹ aos 5 anos e de 106,8 Mg ha⁻¹ aos 10 anos de idade. Da mesma forma, os valores de biomassa estocada em cada compartimento (folhas, galhos, raízes e tronco) nessas mesmas idades (Figuras 11A, 11B, 11D e 11E) também apresentaram concordância com os valores relatados por este autor. Sendo assim, a discrepância entre os valores de biomassa total por hectare ao final dos 21 anos encontradas neste estudo e os valores relatados por Schumacher et al. (2002) pode ser atribuída às diferenças nas taxas de crescimento que ocorrem em idades mais avançadas do povoamento, particularmente, após os 10 anos de idade, ou como sendo influência dos desbastes, que ocorrem no oitavo e no décimo-segundo anos.

Quando considerada apenas a biomassa do tronco, que é o compartimento de maior acúmulo de biomassa na árvore, os valores simulados pelo CO₂Fix aos 21 anos para Passo Fundo e Frederico Westphalen foram de, respectivamente, 167,5 Mg ha⁻¹ e 150,7 Mg ha⁻¹, enquanto que Schumacher et al. (2002) encontraram valores de 214,2 Mg ha⁻¹ e Bizon (2005) de 173,8 Mg ha⁻¹. Watzlawick (2005) ressalta que fatores como o número de árvores por hectare, a idade das árvores e a qualidade do sítio intervêm diretamente na produção de biomassa arbórea em um povoamento florestal. Wink (2009) e Mello et al. (2005) enfatizam a importância de se conhecer as práticas de manejo e o histórico de intervenções realizadas nos povoamentos florestais, tais como a época, a intensidade e a quantidade de material provindo dos desbastes. Caso contrário, a quantidade de carbono acumulado poderá ser subestimada. De acordo com Wink (2009) esta argumentação é fundamental quando se visa a utilização de povoamentos florestais para o sequestro de carbono, especialmente com eucaliptos em rotações de cultivo mais longas. Ainda, segundo Schumacher (1995), as diferenças na

produção de biomassa das raízes para uma mesma espécie, com mesma idade, mas em diferentes locais pode ser atribuída ao grau de armazenamento de nutrientes e às condições inerentes ao sítio, tais como menor teor de argila e matéria orgânica. Quanto maior a disponibilidade de água e nutrientes, maior será a alocação de assimilados para o sistema radicular, visando uma maior exploração espacial do solo.

Com relação à distribuição da biomassa nos compartimentos da árvore observa-se a partir do sexto ano, que com o aumento da idade do povoamento, ocorre redução do percentual de biomassa das folhas, galhos e raiz e o aumento da biomassa do tronco em relação à biomassa total. Contudo, independente da idade, o tronco foi o compartimento que apresentou maior contribuição para a biomassa total (Figuras 11(C) e 11(F)).

Observa-se que até os 10 anos de idade, a sequência, em ordem decrescente da contribuição da biomassa arbórea foi tronco > raiz > galhos > folhas. Enquanto que a partir dessa idade e até o final do período de rotação, os galhos passaram a apresentar maior acúmulo de biomassa do que as raízes. Tal comportamento também foi relatado por Schumacher (2000) e Schumacher et al. (2002). Ao final do período de rotação o compartimento tronco respondeu em média por 82,5% da biomassa total, os galhos por cerca de 10%, seguidas pelas raízes (5,5%) e folhas (2%) (Figuras 11(C) e 11(F)).

A distribuição percentual da biomassa nos compartimentos das árvores de *Pinus taeda* no decorrer da rotação de 21 anos encontrados neste estudo encontra-se dentro dos padrões relatados para povoamentos com esta mesma espécie no RS. Considerando apenas o estoque de biomassa do tronco, verificou-se que a contribuição percentual deste compartimento em relação à biomassa total foi de 56%, 69%, 77% e 82%, respectivamente, para as idades de 5, 10, 15 e 20 anos. Schumacher et al. (2002) relatam para este mesmo compartimento do eucalipto e mesmas idades, percentuais de biomassa equivalentes à 51%; 63%; 70% e 72% da biomassa total. Ainda, para esta mesma região do estado, Copetti (2001) e Vieira et al. (2011) analisando a produção de biomassa arbórea apenas acima do solo (excluindo as raízes) em povoamentos de *Pinus taeda* nas idades de 9 e 18 anos, obtiveram percentuais de carbono no tronco equivalentes a 74% e 76%, respectivamente, em relação à biomassa total.

Estoques de carbono na biomassa arbórea e no solo

No decorrer do período de rotação de 21 anos, o cenário que contempla o plantio de *Pinus taeda* com densidade de 1.666 árvores por hectare para produção de madeira serrada em Passo Fundo e em Frederico Westphalen promoverá o sequestro de carbono arbóreo de, respectivamente, 162,6 e 146,1 MgC ha⁻¹ (Tabela 10). Na realização do primeiro e do segundo desbastes verifica-se que, respectivamente, 52% e 68% do carbono é exportado da área, via colheita, em forma de madeira do tronco. O restante, estocado nos galhos, folhas e raízes que permanece na área em forma de resíduos é incorporado ao solo. No final do período de rotação cerca de 80% do carbono é removido da área via colheita (Tabela 10).

Tabela 10 – Estoque de carbono nos compartimentos arbóreos e totais removidos e remanescentes após os desbastes e a colheita final do povoamento de *Pinus taeda*

Desbaste e colheita	Estoque de Carbono (MgC ha ⁻¹)						
	Tronco	Galho	Folha	Raiz	Total	Removido da área	Permanece na área
Passo Fundo							
1º desbaste (8anos)	11,5	2,9	3,3	4,0	21,7	11,5	10,2
2º desbaste (12 anos)	25,4	4,8	2,6	4,5	37,3	25,4	11,9
Colheita final (21 anos)	83,7	10,5	3,3	6,1	103,6	83,7	19,9
Total	120,6	18,2	9,2	14,6	162,6	120,6	42,0
Frederico Westphalen							
1º desbaste (8anos)	10,1	2,5	3,0	3,6	19,2	10,1	9,1
2º desbaste (12 anos)	22,6	4,3	2,5	4,1	33,5	22,6	10,9
Colheita final (21 nos)	75,4	9,5	3,0	5,5	93,4	75,4	18,0
Total	108,1	16,3	8,5	13,2	146,1	108,1	38,0

Dados gerados pelo CO₂FIX.

Os valores de estoque de carbono arbóreo estimados pelo CO₂Fix para os povoamentos de pinus durante o período de rotação de 21 anos estão dentro da faixa dos valores encontrados por Schumacher et al. (2002), em povoamentos dessa mesma espécie implantados no RS, que foi de 133,39 MgC ha⁻¹ aos 20 anos de idade; e aos relatados por Watzlawick et al. (2005), de 135,49 MgC ha⁻¹, em povoamento implantados no estado do Paraná.

Com relação ao carbono do solo, os estoques iniciais simulados pelo CO₂Fix foram de 55,8 MgC ha⁻¹ em Passo Fundo e de 43,1 MgC ha⁻¹ em Frederico Westphalen (Figura 12(A) e 12 (B)). No primeiro caso, o valor simulado pelo CO₂Fix foi 16% inferior ao valor médio mensurado em campo na profundidade de 30 cm, em área de LATOSSOLO

VERMELHO, cultivado com sistemas de rotação de grãos manejadas sob sistema plantio direto, que foi de 64,83 MgC ha⁻¹. Para simulação em Frederico Westphalen, o valor obtido ficou entre as médias dos valores mensurados em área de LATOSSOLO VERMELHO (50,07 MgC ha⁻¹) e de CAMBISSOLO HÁPLICO (33,97 MgC ha⁻¹). Os estoques de carbono na biomassa arbórea e no solo dos povoamentos de pinus simulados para Passo Fundo e Frederico Westphalen, no decorrer do período de rotação de 21 anos, são representados, respectivamente, nas Figuras 12(A) e 12(B).

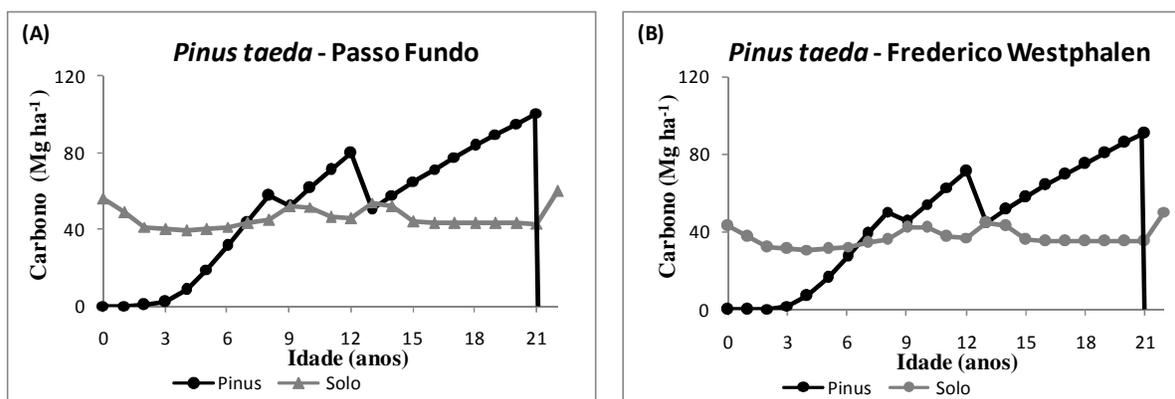


Figura 12 – Estoque de carbono na biomassa arbórea e no solo nos povoamento de *Pinus taeda* em Passo Fundo (A) e em Frederico Westphalen (B) durante 21 anos.

Observa-se que nos dois primeiros anos após a implantação do povoamento de pinus há um decréscimo no estoque de carbono do solo, comparativamente ao estoque inicial. Isso ocorre devido, particularmente, a diminuição de entrada de liter no sistema, anteriormente proporcionado pelas culturas agrícolas, manejadas sob sistema plantio direto. Nos primeiros anos após a implantação do povoamento florestal, ao contrário do eucalipto, o incremento anual corrente do pinus é baixo, e consequentemente o *turnover* das folhas, galhos e raízes é menor, proporcionando assim, uma menor produção de liter ao sistema e acúmulo de carbono no solo. Entretanto, a partir do terceiro ano e, principalmente, com a realização dos desbastes, observa-se o aumento de carbono neste compartimento, sendo que no final do período de rotação este estoque foi de 59,7 MgC ha⁻¹ no povoamento em Passo Fundo e 50,2 MgC ha⁻¹ em Frederico Westphalen. Ao final do período de rotação de 21 anos, o valor referido para o povoamento em Passo Fundo foi 6% superior que o estoque inicial, existente na área. Em Frederico Westphalen a diferença foi de 15%.

Comparando os cenários com *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda*, ambos com período de rotação de 21 anos, dois desbastes e manejo para produção de madeira serrada, verificou-se que o cenário com *Pinus taeda* promoveu maior estoque de carbono na biomassa arbórea e no solo durante os 21 anos (Tabelas 9 e 10). Dentre os fatores que podem ter contribuído para essa diferença estão as taxas de incremento médio anual. O IMA do eucalipto é maior nos primeiros anos do período de rotação, e tende a cair à medida que o povoamento atinge a maturidade, enquanto que o IMA do pinus é menor nos primeiros anos e tende a aumentar e estabilizar com o decorrer dos anos. Além disso, a partir do ano de ocorrência do segundo desbaste (12^o ano) até o final da rotação, o povoamento de pinus passa a ser conduzido com um número maior de árvores (500 árvores ha⁻¹) do que o povoamento de eucalipto (400 árvores ha⁻¹). Jong et al. (2007) utilizando o CO₂Fix para contabilização de estoques de carbono em cenários florestais constituídos de pinus e carvalho sob diferentes regimes de manejo, no México, atribuíram a variabilidade dos estoques de carbono desses cenários às espécies utilizadas, à densidade de plantio, à qualidade do sítio, e ao sistema de manejo adotado. Tais fatores também foram identificados e mencionados em simulações utilizando o CO₂Fix realizadas por Maser et al. (2003).

Portanto, as diferenças no estoque de carbono simuladas pelo CO₂Fix nos cenários compostos por eucalipto e pinus podem ser atribuídas, principalmente, às diferenças nas taxas de crescimento anual dessas espécies e às práticas de manejo adotadas em cada cenário, tais como o ano em que ocorrem os desbastes e os percentuais desbastados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

– O modelo CO₂Fix gerou resultados de produção de madeira e de estoques de carbono para *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* compatíveis aos simulados pelos programas SisEucalipto e SisPinus.

– CO₂Fix apresentou melhores resultados nas simulações de povoamentos florestais com curto período de rotação comparativamente aos povoamentos com período de rotação longos e submetidos a desbastes;

– O cenário que contempla o plantio de *Eucalyptus grandis* com rotação de sete anos e três ciclos de corte, visando produção de madeira para celulose, é o que apresenta maior potencial para sequestro de carbono na vegetação;

– O cenário que contempla o plantio de *Pinus taeda* com rotação de 21 anos, manejado para produção de madeira serrada é o que apresenta maior potencial de sequestro de carbono no solo;

– O cenário que contempla o plantio de *Pinus taeda* manejado para produção de madeira serrada promove maior estocagem de carbono tanto na biomassa arbórea quanto no solo, comparado ao cenário com *Eucalyptus grandis* também manejado para produção de madeira serrada.

– Diferenças no estoque de carbono simuladas pelo CO₂Fix nos cenários compostos por eucalipto e pinus podem ser atribuídas às diferenças nas taxas de crescimento anual dessas espécies e às práticas de manejo adotadas em cada cenário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAMSON, W. G.; GADGIL, M. Growth and reproductive effect in gold enrods solidago (compositae). **American Naturalist**, v. 107, n. 957, p. 651-661, 1973.

BALBINOT, R.; SCHUMACHER, M. V.; WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C.R.. Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 5, n. 1, p. 59-68, 2003.

BALBINOT, R.; VALÉRIO, A. F.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W.; SILVESTRE, R.. Estoque de carbono em plantações de *Pinus* spp. em diferentes idades no sul do estado do Paraná. **Floresta**, v. 38, n. 2, p. 317-324, 2008.

BERLATO, M. A.; FONTANA D. C. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, n.1, p.119-125, 1999.

BIZON, J. M. C. Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantio de *Pinus taeda* L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes. 2005. 95 f. Dissertação (Mestre em Recursos Florestais)–Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul**. Recife: [s.n.], 1973. 431p. (Boletim Técnico, 30).

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Portaria nº 124 de 27 de junho de 2008. Zoneamento agrícola para a cultura da soja no estado do RS/Safra 2008/2009. Disponível em < <http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-agricola/portarias-segmentadas-por-uf>>. Acesso em: 5 nov. 2008.

BROWN, S.; SATHAYE, J.; CANNEL, M.; KAUPPI, P. Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. In: WATSON, R. T., ZINYOWERA, M. C., MOSS, R. H. (Ed.). **Climate Change 1995, Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses**. Cambridge University: Cambridge, 1996. p. 773-797. Report of Working Group II, Assessment Report, IPCC.

CLIMATE-CHARTS. World Climate Index. Disponível em: <<http://www.climate-charts.com>> Acesso em: 12 nov. 2008.

COPETTI, L. **Produção e distribuição da biomassa em povoamento de *Pinus taeda* L. aos 18 anos de idade, na região de Cambará do Sul, RS**. 2001. 38 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal)–Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

COUTO, L.; TSUKAMOTO FILHO, A. R.; NEVES, J. C. L.; PASSOS, C. A. M.; RIBEIRO, C. A. A. S. ARAÚJO, M. M. F. C. Produção e alocação de biomassa em um sistema

agrissilvipastoril com eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 4, p. 321-334, 2004.

DOSSA, D.; CONTO, A. J.; RODIGHERI, H. R.; HOEFLICH, V. A. **Aplicativo com análise de rentabilidade para sistemas de produção de florestas cultivadas e de grãos**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000a. 59 p. (Documentos, 39).

DOSSA, D.; OLIVEIRA, E. B.; ECHAITZA, E. G. FERRON, R. M. SPADA, R. S. **Diagnóstico da produção e comercialização de plantios florestais na região do Alto Uruguai, RS**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000b. 23 p. (Documentos, 51).

DOSSA, D.; DA SILVA, H. D.; BELLOTE, A. F. J.; RODIGHERI, H. R. **Produção e rentabilidade do eucaliptos em empresas florestais**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. 4 p. (Comunicado Técnico, 82).

FREITAS, R.; SCHUMACHER, M, V; CALDEIRA, M. V. W.; SPATHEL, P. Biomassa e conteúdo de nutrientes em povoamento de *Eucalyptus grandis* W. HILL ex MAIDEN plantado em solo sujeito à arenização, no município de Alegrete- RS. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p. 93-104, 2004.

GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; LEITE, H. G.; VILLANI, E. M. A. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região Centro-Leste do estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 35, n. 4, p. 895-905, 2011.

GONÇALVES, J. L. M; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V. A. G.; GAVA, J. L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. cap. 1, p. 1-57.

HIGA, R. C. V.; WREGE, M. S.; RADIN, B.; BRAGA, H.; CAVIGLIONE, J. H.; BOGNOLA, I.; ROSOT, M. A. D.; GARRASTAZU, M. C.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, Y. M. M. **Zoneamento climático: *Pinus taeda* no Sul do Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 17 p. (Documentos, 208).

HIGGA, R.; WREGE, M. S. **Zoneamento climático de *Eucalyptus grandis* para a região Sul do Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2010. 23 p. (Documentos, 209).

HOUGHTON, R. A.; HOBBIIE, H. E.; MELILLO, J. M.; MOORE, B.; PETERSON, B. J.; SHAVER, G. R. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860–1980: a net release of CO₂ to the atmosphere. **Ecological Monographs**, v. 53, n. 3, p. 235-262, 1983.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento dos Recursos Naturais**. Folha SH 22, Porto Alegre e parte das Folhas SH21 Uruguaiiana e SI 22 Lagoa Mirim: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial das terras. Rio de Janeiro: IBGE, 1986. 796 p.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/> > . Acesso em: 5 set. 2010.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Land use, land use change and forestry**: A special report. [WATSON, R. T.; NOBLE, I. R.D. J. (Ed.)]. Cambridge: Cambridge University, 2001. Intergovernment Panel on Climate Change. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/land_use/index.php?idp=0>. Acesso em: 12 fev. 2008.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry**. [PENMAN, J.; GYTARSKY, M.; HIRAISHI, T.; KRUG, T.; KRUGER, D.; PIPATTI, R.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE K.; WAGNER, F.(Ed.)]. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies , 2003. National Greenhouse Gas Inventories Programme. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf >. Acesso em: 12 fev. 2008.

JONG, B. H.; MASERA, O.; OLGUÍM, M.; MARTINEZ, R. Greenhouse gas mitigation potential of combining forest management and bioenergy substitution: A case study from Central Highlands of Michoacan, México. **Forest Ecology and Management**, v. 242, n. 2-3, p. 398-411, 2007.

KAIPAINEN, T.; LISKI, J.; PUSSINEN, A.; KARJALAINEN , T. Managing carbon sinks by changing rotation length in European forests. **Environmental Science and Policy**, v. 7, n. 3, p. 205-219, 2004.

KAUPPI, P.; SEDJO, R. J.; APPS, M.; CERRI, C.; FUJIMORI, T.; JANZEN, H.; KRANKINA, O.; MAKUNDI, W.; MARLAND, G.; MASERA, O.; NABUURS, G. J.; RAZALI, W.; RAVINDRANATH, N.H. Technical and economic potential of options to enhance, maintain and manage biological carbon reservoirs and geo-engineering. In: METZ et al. (Ed.). **Mitigation**. Cambridge: Cambridge University, 2001. p. 302-343. IPCC Third assessment report.

KILAWA, E. C.; LUSAMBO, L. P.; KATIMA, J. H. Y.; AUGUSTINO, S.; SWALEHE, N. O.; LYIMO, B.; LUWAGILA, S. Aboveground biomass equations for determination of carbon storage in plantations forests in Kilombero District, Morogoro-Tanzania. **International Forestry Review**,v. 3, n. 4, p. 317–322, 2001.

KLEINPAUL, I. S.; SCHUMACHER, M. V.; KÖNIG, F. G.; KLEINPAUL, J. J. Acúmulo de serapilheira em povoamentos de pinus e eucaliptos no campus da UFSM. In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL, 9., 2003, Nova Prata.

KONIG, F. G.; SCHUMACHER, M. V.; BRUN, E. J.; KLEINPAUL, I. S.; KLEINPAUL, J. J.; BONAMIGO, A. Acúmulo de serapilheira sobre o solo em uma rotação de *Pinus taeda* no município de Cambará do Sul. In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL, 9., 2003, Nova Prata.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v. 123, n. 1-2, p. 1-22, 2004.

- LEMMA, B.; KLEJA, D. B.; OLSSON, M.; NILSSON, I. Factors controlling soil organic carbon sequestration under exotic tree plantations: A case study using the CO₂Fix model in southwestern Ethiopia. **Forest Ecology and Management**, v. 252, n. 1-3, p. 124-131, 2007.
- LISKI, J.; ILVESNIEMI, H.; MAKELA, A.; STARR, M. Model analysis of the effects of soil age, fires and harvesting on the carbon storage of boreal forest soils. **European Journal of Soil Science**, v. 49, n. 3, p. 407-416, 1998.
- LISKI, J.; PUSSINEN, A.; PINGOUD, K.; MÄKIPÄÄ, R.; KARJALAINEN, T. Which rotation length is favourable for carbon sequestration. **Canadian Journal Forest Research**, v. 31, n. 11, p. 2004-2013, 2001.
- LISKI, J.; NISSINEN, A.; ERHARD, M.; TASKINEN, O. Climatic effects on litter decomposition from arctic tundra to tropical rainforest. **Global Change Biology**, v. 9, n. 4, p. 575-584, 2002.
- LISKI, J.; PALOSUO, T.; PELTONIEMI, M.; SIEVÄNEN, R. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. **Ecological Modelling**, v. 189, n. 1-2, p.168-182, 2005.
- MARTINS, O. S. **Determinação do potencial de sequestro de carbono na recuperação de matas ciliares na região de São Carlos - SP**. 2004. 161 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)–Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.
- MASERA, O. R.; GARZA-CALIGARIS, J. F.; KANNINEN, M.; KARJALAINEN, T.; LISKI, J.; NABUURS, G. J.; PUSSINEN, A.; JONG, B. H. J. de; MOHREN G. M. J. Modelling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: The CO₂FIX V.2 approach, **Ecologic Modelling**, v. 164, n. 2-3, p. 177-199, 2003.
- MELLO, A. A.; CARNIERI, C.; ARCE, J. E.; SANQUETTA, C. A. Planejamento florestal visando à maximização dos lucros e a manutenção do estoque de carbono. **Revista Cerne**, v. 11, n. 3, p. 205-217, 2005.
- NABUURS, G. J.; SCHELHAAS, M. J. Carbon profiles of forest types across Europe assessed with CO₂FIX. **Ecological Indicators**, v. 1, n. 3, v. 213-223, 2002.
- OLIVEIRA, E. **Um sistema computadorizado de prognose do crescimento e produção de pinus com critérios quantitativos para avaliação técnica e econômica de regimes de manejo**. 1995. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)–Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.
- OLIVEIRA, E. B.; RIBASKI, J.; ZANETTI, E. A.; PENTEADO JUNIOR, J. F. Produção, carbono e rentabilidade econômica de *Pinus elliotti* e *Eucalipytus grandis* em sistemas silvipastoris no sul do Brasil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 52, p. 45-56, 2008.
- OLIVEIRA, E. **Softwares para manejo e análise econômica de plantações florestais**. Colombo: Embrapa Florestas. 2011. 68 p. (Documentos, 216)

PAUL, E. A.; MORRIS, S. J.; SIX, J.; PAUSTIAN, K.; GREGORICH, E. G. Interpretation of soil carbon and nitrogen dynamics in agricultural and afforested soils. **Soil Science Society of America**, v. 67, n. 5, p. 1620-1628, 2003.

PAVAN, J. A.; ALVES, T. W.; SOUZA, M. A. Viabilidade econômica da produção de eucaliptos no Rio Grande do Sul. **ABCustos Associação Brasileira de Custos**, v. V, n. 1, p.1-32, 2010.

PEREIRA, A. R. BARROS, N. F. DE; ANDRADE, D. C. DE; CAMPOS, P. T. DE A. Concentração e Concentração e distribuição de nutrientes em *Eucalyptus grandis* em função da idade, cultivado na região do cerrado. **Brasil Florestal**, n. 59, p. 27–37, 1984.

PORTÉ, A.; BOSCH, A.; CHAMPION, I; LOUSTAU, D. Estimating the foliage area of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) branches and crowns with application to modelling the foliage area distribution in the crown. **Annals of Forest Science**, v. 57, n. 1, p. 73-86, 2000.

REED, K. L. An ecological approach to modelling the growth of forest trees. **Forest Science**, v. 26, n. 1, p. 33-50, 1980.

REIS, M. G. F.; KIMMINS, J. P.; REZENDE, G. C. DE; BARROS, N. F. DE. Acúmulo de biomassa em uma seqüência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, v. 9, n. 2, p. 149-162, 1985.

REIS, M. G. F.; REIS, G. G.; VALENTE, O. F.; FERNANDES, H. A. C. “Seqüestro” e armazenamento de carbono em florestas nativas e plantadas nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X “SEQÜESTRO” DE CO₂: uma oportunidade de negócios para o Brasil, 1994, 27. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 155-195.

RODIGHERI, H. R.; PINTO, A. M.; OHLSON, J. C. Rentabilidade econômica do eucalipto conduzido para produção de madeira serrada no norte do estado do Paraná. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 44, p. 49-94, 2002.

RODIGHERI, H. R.; GRAÇA, L. R.; LIMA, M. A. **Indicadores de custos, produtividade, renda e créditos de carbono de plantios de eucaliptos e pinus em pequenas propriedades rurais**. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. 8 p. (Comunicado Técnico, 135).

RIBASKI, J.; DEDECEK, R. A.; MATTEI, V. L.; FLORES, C. A.; VARGAS, A. F. C.; RIBASKI S. A. G. **Sistemas silvipastoris**: estratégias para o desenvolvimento rural sustentável para a metade sul do estado do Rio Grande do Sul. Colombo: Embrapa Florestas. 2005. 8 p. (Comunicado Técnico, 150).

SANQUETA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: Imprensa Universitária da UFPR, 2002. p.119-140.

SANTANA, R. C.; BARROS, N., F.; LEITE, H. G.; COMERFORD N. B.; NOVAIS, R. F. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, v. 32, n. 4, p. 697-706, 2008.

SELLE, G. L.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Classificação de sítio para *Pinus taeda* L., através da altura dominante, para a região de Cambará do Sul, RS, Brasil. **Ciência Florestal**, v. 4, n. 1, p. 77-95, 1994.

SEMA. UFSM. Secretaria do Meio Ambiente; Universidade Federal de Santa Maria. Inventário florestal contínuo do Rio Grande do Sul, 2001. Disponível em: < <http://w3.ufsm.br/ifcrs>>. Acesso em: jul. 2009.

SCHELHAAS, M. J.; VAN ESCH, P. W.; GROEN, T. A.; JONG, B. H. J.; KANNINEN, M.; SCHUMACHER, M. V. **Quantificação do carbono orgânico em florestas de *Pinus taeda* L, com diferentes idades**. Santa Maria: UFSM, 2000. (Relatório de pesquisa).

SCHELHAAS, M. J.; VAN ESCH, P. W.; GROEN, T. A.; JONG, B. H. J.; KANNINEN, M.; LISKI, J.; MASERA, O.; MOHREN, G. M. J.; NABUURS, G. J.; PALOSUO, T.; PEDRONI, L.; VALLEJO, A.; ANDVILN, T. **CO₂FIX V 3.1 manual**: a modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems. Wageningen: [s.n.], 2004. 122 p. Alterra-repport 1068.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALDEIRA, M. V. W.; WATZLAWICK, L. F. Estoque de carbono em florestas de *Pinus taeda* L. e *Acacia mearnsii* de Wild. plantadas no estado do Rio Grande do Sul. In: SANQUETTA, C. R. et al. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: Imprensa Universitária da UFPR, 2002. p.141-152.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N. Biomassa em povoamentos de *Eucalyptus* sp. de pequenas propriedades rurais em Vera Cruz, RS. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 1, p. 17-22, 2011.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 20, n. 2, p. 179-189, 1996.

STAPE, J. L. **Production ecology of clonal *Eucalyptus plantations* in northeastern Brazil**. 2002, 225 p. Thesis—Colorado State University, Fort Collins, 2002.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Eucalyptus production and the supply, use and the efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1/2, p. 17–31, 2004.

STRECK, A.V; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre : Emater/RS Ascar, 2008. 222 p.

WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W. Estoque de carbono orgânico e biomassa em *Pinus taeda* L. **Biomassa e Energia**, v.2, n.1, p. 7-17, 2005.

WINK, C. **Estoque de carbono em plantações de *Eucalyptus* sp. implantados em campo nativo**. 2009. 130 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Florestal)—Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. Decision 17/CP.7: Modalities and procedures for a clean development mechanism as defined in Article 12 of the Kyoto Protocol. 2001. Disponível em: <<http://unfccc.int/documentation/decisions>>. Acesso em: 16 abr. 2007.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. Decision 19/CP.9: Modalities and procedures for afforestation and reforestation project activities under the clean development mechanism in the first commitment period of the Kyoto Protocol. 2003. Disponível em: <<http://www.unfccc.int/documentation/decisions> >. Acesso em: 16 abr. 2007.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V.; BONACINA, D. M. Biomassa e nutrientes removidos no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em Cambará do Sul, RS. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p. 371-379, 2011.

CAPÍTULO 4

AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE SISTEMAS AGRÍCOLAS E FLORESTAIS INCLUINDO A GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO

1. INTRODUÇÃO

No Rio Grande do Sul (RS) a deficiência hídrica associada a práticas nem sempre adequadas de manejo têm se mostrado importantes fatores restritivos para a estabilidade da produtividade agrícola, em especial, da cultura da soja, registrando-se quebras de produtividade, além da degradação dos recursos naturais e de prejuízos econômicos ao produtor (CUNHA et al., 2004).

Dentre os objetivos essenciais do produtor rural encontram-se aqueles que permitem obter renda no curto prazo para viabilizar os seus objetivos de longo prazo. Essas escolhas levam em consideração tanto os aspectos quantitativos quanto os qualitativos, sendo, todavia, os primeiros, por vezes, os mais importantes (DOSSA; VILCAHUAMAN, 2001).

Tendo em vista a situação instalada de instabilidade da produtividade da soja, e com o advento dos instrumentos de política climática global, este trabalho parte do pressuposto que o plantio de florestas comerciais incluindo a geração de créditos de carbono pode ser uma boa alternativa para os produtores locais. Considera-se que o uso de terra com silvicultura permitirá a manutenção da produção através do tempo, com vantagens adicionais de promover maior proteção dos recursos naturais e contribuir para a redução de gases de efeito estufa (GEE) da atmosfera. A identificação e seleção de diferentes sistemas de uso da terra deve levar em conta aspectos relacionados com a sustentabilidade dos ecossistemas e com o retorno financeiro.

Nesta proposição, a possibilidade de agregar as receitas advindas dos créditos de carbono ao sistema florestal é considerada um atrativo para a adoção da atividade. Entretanto, para subsidiar os produtores com informações consistentes, que os auxiliem na tomada de decisão quanto a conversão das áreas produtoras de grãos em sistemas florestais, é necessário uma análise de viabilidade que contemple variáveis econômicas e ambientais.

Segundo Irakuri e Lazzarotto (2010), as estimativas dos custos e lucros de produção de uma determinada atividade constituem ferramentas essenciais para o processo decisório,

pois permitem vislumbrar o contexto atual e avaliar a viabilidade econômica de diversos tipos de empreendimentos.

De acordo com Hildebrandt et al. (2010), a avaliação econômica de projetos de investimento é normalmente usada como uma forma de identificar os fatores que são indicativos de sua viabilidade. No entanto, uma condição de incerteza em relação ao ambiente econômico dificulta o processo de tomada de decisão. No caso das atividades florestais, a complexidade é ainda maior em função do tempo necessário para o retorno do investimento. O horizonte de planejamento dos projetos florestais em relação à produção agrícola acarreta maior incerteza na tomada de decisão devido à multiplicidade de riscos. Tais riscos podem estar associados, por exemplo, aos preços dos produtos, à instabilidade da produtividade, ao mercado consumidor e aos fenômenos biofísicos, tais como danos causados por tempestades, incêndios, secas e ataques de insetos.

Deste modo, partindo da hipótese que a conversão de áreas agrícolas cultivadas com soja em florestas comerciais, incluindo a geração de créditos de carbono, constitui uma alternativa economicamente viável ao produtor, o objetivo principal do trabalho foi proceder a uma avaliação econômica comparativa dos sistemas de sucessão e rotação de culturas e sistemas florestais com espécies de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* tomando como referência os municípios de Passo Fundo e Frederico Westphalen, situados na região noroeste do RS.

Os objetivos específicos incluem:

- Simular projetos florestais com a inclusão dos créditos de carbono, utilizando espécies de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* em diferentes regimes de manejo;
- Estimar a remoção antrópica líquida de gases de efeito estufa (créditos de carbono) gerados pela implantação de sistemas florestais em áreas cultivadas com sistemas de sucessão e de rotação de grãos;
- Levantar os custos e as receitas associados à implantação e à manutenção dos sistemas agrícolas e florestais, incluindo aqueles relacionados à geração dos créditos;
- Proceder a uma avaliação econômica comparativa do uso atual das terras com sistemas de sucessão e de rotação de culturas e dos sistemas florestais, com e sem os créditos de carbono.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Para aplicação deste estudo de caso, foram selecionadas áreas representativas de produção de grãos da região noroeste do RS, localizadas nos municípios de Passo Fundo e Frederico Westphalen, sujeitas à ocorrência sistemática de quebras de produtividade da cultura principal, isto é, da soja. O município de Passo Fundo está localizado nas coordenadas geográficas 28°15'39"S e 52°24'33"W, a uma altitude de 687 m, e o de Frederico Westphalen, nas coordenadas 27°21'33"S e 53°23'40"W, a uma altitude inferior, de 566 m.

A média dos valores de produtividade de grãos, de madeira e do estoques de carbono quantificado nos sistemas agrícolas e florestais nesses dois municípios, foi utilizada para se proceder à contabilização dos créditos e à avaliação econômica dos cenários estudados.

2.2 Geração de créditos de carbono e simulações de cenários florestais

A geração de créditos de carbono pelos sistemas florestais foi realizada a partir da quantificação das chamadas *remoções antrópicas líquidas de gases de efeito estufa (GEE)* que ocorrem por meio da implantação de florestamentos e reflorestamentos em áreas anteriormente caracterizadas como não florestadas (UNFCCC, 2003; IPCC, 2003; 2006). Esta remoção antrópica consiste na diferença entre a *remoção real líquida de GEE no cenário de projeto*⁴ (RR_{CP}), a *remoção real líquida de GEE no cenário de linha de base*⁵ (RR_{LB}) e as *fugas*⁶ (F), conforme descrito na equação 1.

$$RAL = RR_{CP} - RR_{LB} - F \quad (\text{Eq. 1})$$

Cada tonelada de carbono removida da atmosfera, assim como cada tonelada de gás de efeito estufa emitida em decorrência das atividades de um projeto, é convertida para CO₂eq⁷ e, posteriormente, em créditos de carbono. As conversões do carbono bem como dos GEE em CO₂eq são realizadas utilizando, respectivamente, a massa molecular e os fatores de

⁴ É a diferença entre o estoque de C e as emissões de GEE que ocorrem dentro dos limites do projeto, durante o período de execução do mesmo.

⁵ É a mudança no estoque de carbono, no cenário que ocorreria caso a atividade florestal não fosse implantada.

⁶ São as emissões de GEE que ocorrem fora dos limites do projeto.

⁷ É a unidade de contabilização dos créditos de carbono. Uma tonelada de CO₂eq é igual a uma Redução Certificada de Emissão.

emissão pertinentes à cada gás. A conversão do CO₂eq em créditos é feita considerando que uma ton CO₂eq equivale a um crédito de carbono (UNFCCC, 2003).

2.2.1 Cenários de projetos de reflorestamento

Os cenários florestais a serem analisados foram simulados contemplando o cultivo das espécies *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* solteiros e consorciados com o milho. Os cenários envolvendo o plantio solteiro dessas espécies foram simulados no Capítulo 3 deste trabalho, o qual consta a prognose de produção de madeira e a quantificação do estoque de carbono nos compartimentos arbóreo e no solo. Com base nesses cenários foram criados outros três, considerando o plantio do milho nos dois primeiros anos do projeto. Os cenários utilizados para contabilização dos créditos de carbono e para avaliação econômica foram os seguintes:

- *Eucalyptus grandis* solteiro manejado para produção de celulose com três rotações de sete anos de idade, com densidade de 1.666 árvores por hectare; *Eucalyptus grandis* manejado para produção de celulose com três rotações de sete anos e densidade de 1.666 árvores por hectare, consorciado com milho nos dois primeiros anos;

- *Eucalyptus grandis* solteiro manejado para produção de madeira serrada com rotação de 21 anos, densidade de 1.666 árvores por hectare; *Eucalyptus grandis* solteiro manejado para produção de madeira serrada com rotação de 21 anos, densidade de 1.666 árvores por hectare consorciado com milho nos dois primeiros anos;

- *Pinus taeda* solteiro manejado para produção de madeira serrada com rotação de 21 anos e densidade de 1.666 árvores por hectare; *Pinus taeda* manejado para produção de madeira serrada com rotação de 21 anos, densidade de 1.666 árvores por hectare, consorciado com milho nos 2 primeiros anos.

Em todos os cenários foi considerado um horizonte de planejamento de 21 anos. Para os cenários contemplando o plantio solteiro das espécies florestais, a produção em volume de madeira e a mudança no estoque de carbono no decorrer dos 21 anos foram estimadas levando em conta a média anual dos valores obtidos para os municípios de Passo Fundo e Frederico Westphalen. Os valores de produção em madeira e os estoques de carbono foram determinados utilizando, respectivamente, os programas SisEucalipto, SisPinus (OLIVEIRA, 1995) e o CO₂Fix V 3.2 (SCHELHAAS et al., 2003), conforme descrito no Capítulo 3. No caso

dos cenários onde ocorre o plantio consorciado com o milho, a produtividade da espécie florestal foi considerada a mesma que a do plantio solteiro, e o rendimento do milho foi de 2,5 ton. ha⁻¹, segundo informações contidas nos estudos realizados por Moniz (1987) e Rodigheri et al. (1997).

A remoção antrópica líquida de GEE no cenário de projeto foi calculada com base na diferença entre: o estoque de carbono das folhas, galhos e raízes que permanecem na área após a realização dos desbastes e da colheita final; as emissões de GEE decorrentes da perda de biomassa devido à remoção da vegetação presente na área para implantação da floresta; e as emissões oriundas da queima de combustível fóssil. No caso do eucalipto, foram incluídas também as emissões de GEE advindas da aplicação de fertilizante nitrogenado.

As emissões de CO₂ oriundas da vegetação a ser suprimida para implantação do projeto se referem ao carbono estocado nas culturas de soja e de trigo, as quais compõem a sucessão anual presente em praticamente todos os sistemas de sucessão ou rotação de culturas adotados na região. Essas emissões corresponderam à média dos valores de carbono contabilizados no município de Passo Fundo e de Frederico Westphalen, que foi de 8,5 MgC ha⁻¹, ou seja 31,17 Mg CO₂eq ha⁻¹, conforme estimativas apresentadas no Capítulo 2 deste trabalho. Este estoque foi contabilizado no ano zero para todos os cenários de projeto analisados.

Os valores das emissões decorrentes da atividade de projeto com o eucalipto foram extraídos do projeto de créditos de carbono da Plantar Reflorestamentos (UNFCCC, 2010), obtendo-se o valor de 3,36 Mg CO₂eq ha⁻¹ no decorrer dos 21 anos, ou seja 0,16 Mg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹. No caso do pinus, os dados de emissões advindos da queima de combustíveis fósseis foram adaptados de estudos realizados por Fernandes (2010). Esses autores mencionam um valor emitido no período de 20 anos equivalente a 1,60 Mg CO₂eq ha⁻¹. Este valor foi diluído anualmente, totalizando 0,08 Mg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹.

A remoção real líquida de GEE no cenário de linha de base, no cenário de projeto bem como a remoção antrópica líquida no decorrer dos 21 anos são demonstradas no Apêndice 1.

2.2.2 Delineamento do cenário de linha de base

O cenário de linha de base representa a evolução da situação que ocorreria na área caso a atividade florestal para geração de créditos de carbono não fosse implantada.

O cenário de linha de base para todos os cenários de projeto foi definido com base na tendência de uso histórico da área, conforme preconiza as premissas metodológicas da UNFCCC (UNFCCC, 2003). Foi definido como cenários de linha de base a manutenção do uso da terra com o sistema de sucessão trigo/soja. Portanto, a soma das mudanças do estoque de carbono na biomassa viva deste cenário, durante todo período de execução do projeto resultou em zero, uma vez que é prevista a continuação dessa atividade agrícola naquela região para os próximos anos.

2.2.3 Fugas

O termo “fuga” é definido nos projetos de créditos de carbono como as emissões de GEE, que ocorrem fora dos limites do projeto, mas que são advindas da execução do mesmo. No presente estudo não foram contabilizadas as fugas, tendo em vista que não foi previsto nenhum deslocamento de atividades existentes dentro da área do projeto para áreas circunvizinhas, e que o produto florestal, a madeira, será comercializado em pé.

2.3 Avaliação econômica

Procedeu-se à análise econômica dos sistemas de sucessão de culturas trigo/soja, de rotação trigo/soja – trigo/soja – trigo/milho, comparativamente aos cenários florestais com espécies de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* para produção comercial de madeira, com e sem a inclusão dos créditos de carbono.

2.3.1 Indicadores econômicos

A avaliação econômica foi realizada utilizando os seguintes indicadores: Valor Presente Líquido (VPL), Razão Benefício Custo (B/C) e Taxa Interna de Retorno (TIR).

O VPL é definido como sendo a diferença entre o valor presente das receitas e o valor presente dos custos, para uma dada taxa de desconto, durante o horizonte de planejamento do projeto. A razão B/C é baseada na relação do valor atual dos benefícios e o

valor atual dos custos, para uma dada taxa de desconto; e a TIR é a taxa anual de retorno do capital investido (REZENDE; OLIVEIRA, 2000).

2.3.2 Fluxo de caixa e taxa de desconto

Para proceder à avaliação econômica, todos os custos e receitas incidentes nos sistemas foram ordenados em um fluxo de caixa anual, atualizado, considerando um horizonte de planejamento de 21 anos e uma taxa de desconto de 10% a.a. Optou-se por esta taxa por ser bastante utilizada em análises de projetos florestais e também por ser recomendada pelo Centro de Estudos Integrados sobre o Meio Ambiente e Mudanças Climáticas do Ministério do Meio Ambiente no documento que trata dos critérios de elegibilidade e indicadores de sustentabilidade para a avaliação de projetos candidatos ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MMA, 2002). De acordo com Lima Júnior (1995), nos investimentos florestais existe uma grande dificuldade em se determinar a taxa de desconto a ser utilizada, uma vez que ela não pode ser padronizada. A taxa de juros deve variar de acordo com as características do projeto, da empresa, da conjuntura econômica, entre outros fatores. O mesmo autor afirma que a taxa de desconto utilizada em projetos florestais geralmente varia entre 6 e 12% ao ano.

2.3.3 Composição dos custos

Os custos pertinentes aos sistemas agrícolas foram aqueles relacionados à implantação, manutenção e colheita de cada safra, em uma área de um hectare de terra. No caso dos sistemas florestais, os custos foram referentes à implantação, à manutenção e à geração dos créditos de carbono. Não foram incluídos os custos de desbastes e de colheita, visto que foi utilizado o valor de venda da madeira em pé.

O custo envolvido na produção das culturas agrícolas teve como referência a Conab (CONAB, 2010) e foram divididos da seguinte forma: custeio da lavoura (mão de obra, insumos, sementes), despesas pós-colheita (transporte, armazenamento, assistência técnica), despesas financeiras, depreciações, encargos sociais, custo da terra, dentre outros. O custeio do milho em consórcio com as espécies florestais foi equivalente a 60% do custo do plantio homogêneo desta cultura, conforme sugerido por Rodigheri et al. (1997). O custo da terra correspondeu à média dos valores do hectare de terra destinada à lavoura na região de Passo Fundo e de Frederico Westphalen e teve como referência a Conab (CONAB, 2010).

Os custos relacionados aos sistemas florestais solteiros e consorciados com milho foram adaptados e atualizados a partir da planilha de custos da Embrapa Florestas (GRAÇA et al., 2000; RODIGHERI, 2005). Tais custos foram referentes à implantação e manutenção dos sistemas, incluindo mecanização, insumos, mudas, mão-de-obra e o custo da terra.

Os custos de transação do carbono, por hectare, foram calculados com base na média dos valores informados pelo *United Nations Development Programme* (UNDP, 2006) e adaptados por Fernandes (2010). Foi considerado um valor fixo por projeto de US\$ 142.500,00, os quais foram diluídos para um projeto de 7.000 ha, conforme Fernandes (2010), resultando em um valor correspondente a US\$ 20,35 ha⁻¹. Foi usada a conversão de 1,00 US\$ = R\$ 2,00, resultando assim em um valor de R\$ 40,70 ha⁻¹. O custo de transação do carbono corresponde às etapas de elaboração do projeto de créditos de carbono, monitoramento, verificação, registro e emissão dos créditos. Vale ressaltar que os valores de custos informados devem ser entendidos como indicativos e não como base para decisões de investimento, uma vez que os custos de transação podem variar consideravelmente conforme o tipo de projeto. Os custos relacionados à geração dos créditos foram contabilizados no ano zero do fluxo de caixa.

2.3.4 Composição das receitas

As receitas oriundas dos sistemas foram obtidas multiplicando a produtividade média das culturas pelos preços dos produtos. Foi considerada a venda dos produtos agrícolas (grãos), da madeira em pé e dos créditos de carbono.

Dados de produtividade de grãos das espécies agrícolas foram obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010) e provenientes de pesquisas realizadas no Rio Grande do Sul (FLEIG et al., 1993; MONIZ, 1987). A produtividade das espécies florestais em plantios solteiros foram estimadas pelo programa SisEucalipto e SisPinus, conforme apresentado no Capítulo 3 deste trabalho, constando da Tabela 1. Para os sistemas consorciados com milho foi mantida a mesma produtividade da espécie florestal em cultivo solteiro, tendo em vista que estudos realizados por Moniz (1987) e Rodigheri et al. (1997) evidenciaram não haver alterações na produtividade da espécie florestal. No caso do milho, foi considerado o plantio de três fileiras entre as árvores nos dois primeiros anos após a implantação do sistema florestal.

Tabela 1 – Produtividade média anual das culturas agrícolas e volume médio de madeira produzido nos desbastes e na colheita final

Culturas agrícolas	Rotação (anos)	Desbastes e Colheita final	Produtividade (ton ha⁻¹)	Fonte
Soja	Anual	-	2,5	IBGE (2010)
Trigo	Anual	-	2,4	IBGE (2010)
Milho	Anual	-	5,4	IBGE (2010)
Milho em consórcio	Anual	-	2,5	Rodigheri (1997)
Culturas florestais	Rotação (anos)	Desbastes e Colheita final	Volume* (m³/ha)	Fonte
Eucalipto Celulose	7	Colheita final	286,9	SisEucalipto
	7	Colheita final	258,2	SisEucalipto
	7	Colheita final	232,3	SisEucalipto
Eucalipto Serraria	21	I desbaste (7 anos)	98,5	SisEucalipto
		II desbaste(12 anos)	128,9	SisEucalipto
		Colheita final	286,5	SisEucalipto
Pinus Serraria	21	I desbaste (8 anos)	44,2	SisPinus
		II desbaste (12 anos)	116,0	SisPinus
		Colheita final	411,2	SisPinus

*Média dos valores obtidos nas simulações em Passo Fundo e Frederico Westphalen.

No que se refere aos preços dos produtos agrícolas e florestais, foram utilizados valores sugeridos pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA, pelo International Monetary Found - IMF e pelo Radar Silviconsult. Os valores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Preços dos produtos agrícolas e florestais

Culturas agrícolas	Preço (R\$ ton⁻¹)	Fonte
Soja	784,00	IMF (2010); CEPEA (2010)
Trigo	433,00	IMF (2010); CEPEA (2010)
Milho	417,00	IMF (2010); CEPEA (2010)
Culturas florestais	Preço (R\$ m⁻³)	Fonte
Eucalipto celulose	48,60	Radar Silviconsult (2010); CEPEA (2010)
Eucalipto energia	37,20	Radar Silviconsult (2010); CEPEA (2010)
Eucalipto serraria I	140,00	Radar Silviconsult (2010); CEPEA (2010)
Eucalipto serraria II	79,10	Radar Silviconsult (2010); CEPEA (2010)
Pinus celulose	31,40	Radar Silviconsult (2010); CEPEA (2010)
Pinus energia	26,20	Radar Silviconsult (2010); CEPEA (2010)
Pinus serraria I	101,20	Radar Silviconsult (2010); CEPEA (2010)
Pinus serraria II	73,10	Radar Silviconsult (2010); CEPEA (2010)

O valor utilizado para comercialização do crédito de carbono teve como referência o preço do ano de 2010 informado pelo Ecosystem Marketplace (2011) no documento “*State of the Forest Carbon Markets 2010*”. Segundo esse documento, o preço da tonelada (Mg) de CO₂eq foi de US\$ 5,57. O valor de conversão do dólar para real foi de R\$ 2,00. As receitas referentes aos créditos foram contabilizadas nos anos em que ocorrem os desbastes e a colheita final.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estimativa das Reduções Certificadas de Emissões (RCE)

Dentre os cenários que contemplam o plantio solteiro de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda*, o eucalipto manejado para produção de celulose, com três rotações de sete anos foi o que apresentou maior capacidade para geração de Redução Certificada de Emissão durante o período de 21 anos, promovendo a geração de respectivamente, 46,8, 46,3 e 48,7 ton CO₂eq ha⁻¹ (ou créditos de carbono) na primeira, segunda e terceira rotação (Tabela 3 e Apêndice 1). Os créditos gerados por este sistema correspondem ao carbono estocado nos compartimentos folhas, galhos, raízes que são deixados na área após a colheita da madeira a cada sete anos. O carbono estocado no compartimento tronco é exportado do sistema e não entra no cômputo dos créditos.

Quando considerado o manejo das espécies para produção de madeira serrada, com rotação de 21 anos e realização de dois desbastes, o cenário com pinus apresentou maior número de créditos (136,5) do que o cenário com eucalipto (65,72) conforme Tabela 3. A maior capacidade de estocagem de carbono no cenário com pinus pode ser atribuída ao sistema de manejo, onde maior número de árvores é conduzido após o segundo desbaste até a colheita final, e devido ao maior percentual de galhos e folhas nessa espécie, no final do período de rotação, comparativamente às árvores de eucalipto. As estimativas da remoção antrópica líquida de GEE ao longo do período de execução de cada cenário de projeto, bem como a remoção real líquida no cenário de linha de base, no cenário de projeto e as fugas são apresentadas no Apêndice 1.

Tabela 3 – Reduções Certificadas de Emissões - RCE (créditos de carbono) geradas nos cenários com cultivo solteiro de eucalipto e de pinus

Reduções Certificadas de Emissão – RCE (Unidade)			
Ano do desbaste e da colheita final	Eucalipto manejado para celulose	Eucalipto manejado para serraria	Pinus manejado para serraria
7 ou 8	46,8	31,0	35,35
12 /14	46,3	18,7	41,83
21	48,7	15,9	59,36
Total	141,8	65,6	136,5

Cálculo efetuado com base na média dos valores obtidos em Passo Fundo e Frederico Westphalen.

Colheita do eucalipto para celulose: 7, 14 e 21 anos; Desbaste do eucalipto para serraria: 7 e 12 anos;

Desbaste do pinus: 8 e 12 anos; Colheita final: 21 anos.

3.2 Avaliação econômica dos cenários com *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda*

3.2.1 Análise dos custos

Os custos pertinentes à implantação de um hectare de soja, trigo e milho foram de, respectivamente, R\$ 1.300,00 ha⁻¹, R\$ 1.400,00 ha⁻¹ e R\$ 2.000,00 ha⁻¹.

No caso dos sistemas florestais, o custo de implantação de um hectare de pinus foi de R\$ 1.503,70 ha⁻¹ e os custos de manutenção anual variaram entre R\$ 300,00 ha⁻¹ a R\$ 500,00 ha⁻¹. Foi considerado para todos os cenários um custo anual da terra de R\$ 270,00 ha⁻¹. Deste modo, o custo total no primeiro ano no cenário contemplando o plantio de pinus para serraria correspondeu à soma do custo de implantação e do custo da terra, totalizando R\$1.773,70 ha⁻¹ (Apêndice 2). Quando incluído o custo de geração do crédito de carbono (R\$ 40,71 ha⁻¹), este correspondeu a 2,7% do custo total de implantação de um hectare de pinus em cultivo solteiro (Apêndice 3). No caso do plantio consorciado, o custo relacionado ao plantio do pinus correspondeu a 70% do custo total, o plantio do milho a 27% e a emissão do crédito de carbono a 3%.

No cenário com eucalipto manejado para serraria, o custo do sistema florestal foi equivalente a R\$ 1.819,20 ha⁻¹ e os custos de manutenção variaram entre R\$ 300,00 ha⁻¹ e R\$ 560,00 ha⁻¹. O custo relacionado aos créditos de carbono, por hectare, correspondeu a 2,5% do custo total do primeiro ano do projeto. Para este cenário, o custo relacionado à implantação do milho no sistema consorciado correspondeu a 24% (Apêndice 2). Ressalta-se que não foram considerados os custos de desbastes e de colheita, tendo em vista que considerou-se a venda da madeira em pé.

3.2.2 Análise das receitas

As receitas anuais pertinentes aos cenários agrícolas e florestais solteiros e consorciados com o milho, incluindo os créditos de carbono, são apresentadas na Figura 1.

O sistema de sucessão de culturas trigo/soja apresentou receitas anuais positivas durante os 21 anos, com exceção do ano zero, o qual foi considerado o ano de implantação. Quando comparado este cenário ao de rotação de culturas envolvendo o plantio de milho a cada três anos, verifica-se que o terceiro ano da rotação apresentou receitas líquidas negativas. As receitas negativas no terceiro ano deste cenário podem ser atribuídas à baixa produtividade do trigo e aos maiores custos de produção do milho. Além disso, os baixos preços dessas

culturas nos anos de 2009 e de 2010 também refletiram negativamente na rentabilidade do sistema. Ainda, com relação às receitas que compõem os sistemas agrícolas verificou-se que maiores montantes são advindos do cultivo da soja, tanto no sistema de sucessão quanto no de rotação de culturas. No primeiro caso, as receitas da venda dos grãos de soja durante os 21 anos correspondem a 65% da receita total enquanto que, a receita advinda do trigo 35%. Já no sistema de rotação trigo/soja –trigo/soja – trigo/milho a receita da soja corresponde a 44%, do trigo 34% e do milho 22%. Esse comportamento é justificado pelo melhor preço alcançado na soja, e devido ao baixo rendimento médio das demais culturas naquela região.

Com relação aos cenários florestais, o plantio do pinus para produção de madeira serrada é o que apresenta maiores receitas líquidas, seguido pelo cenário eucalipto para celulose e por último eucalipto para serraria (Figura 1). Embora o plantio do eucalipto com rotação de sete anos apresente maior produção de madeira, o preço da mesma para fins de produção de polpa é baixo, comparado ao preço da madeira utilizada em serraria.

Comparando as receitas dos sistemas florestais solteiros e consorciados com o milho verificou-se que no cenário eucalipto para celulose, a inserção do milho nos dois primeiros anos, proporcionou um aumento de 10% na receita total, visto que, o milho é plantado no início de cada rotação de sete anos. Para os outros dois cenários manejados para serraria, a inserção do milho refletiu em um aumento de 3% nas receitas.

A inclusão dos créditos de carbono proporcionou um aumento na receita líquida nos cenários com eucalipto para celulose, eucalipto para serraria e pinus para serraria de, respectivamente, 5%, 4% e 5%, comparativamente ao cenário analisado sem os créditos de carbono.

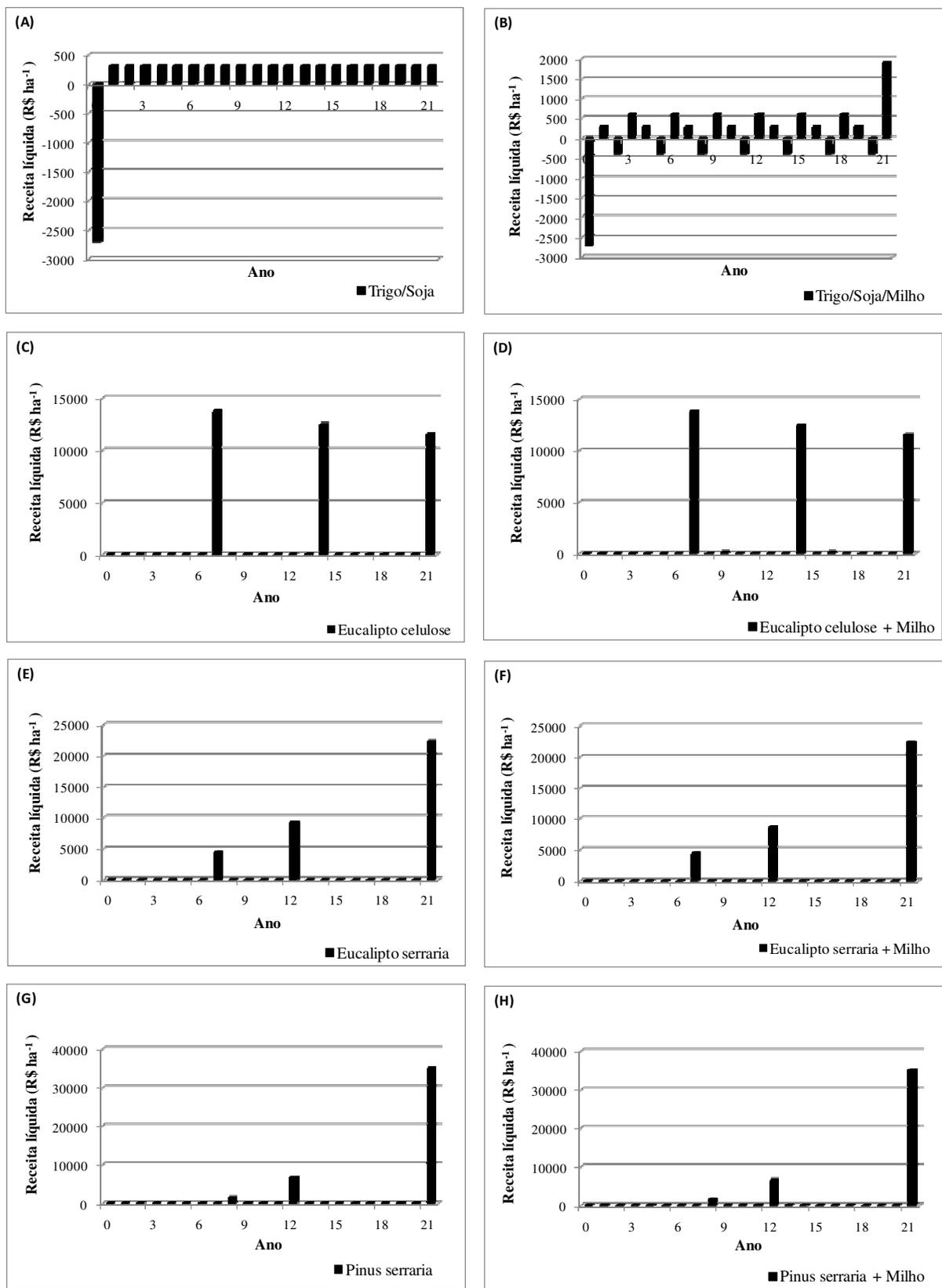


Figura 1 – Receitas líquidas anuais (R\$ ha⁻¹) dos cenários agrícolas e florestais.

3.2.3 Indicadores econômicos

De acordo com o Valor Presente Líquido, calculado para uma taxa de juros de 10% ao ano, todos os cenários de projetos avaliados, com e sem a inclusão dos créditos de carbono, foram rentáveis economicamente (Tabela 4).

Tabela 4 – Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Razão Benefício Custo (B/C) dos cenários agrícolas e florestais para taxa de juros de 10% a.a.

Cenário	Indicadores econômicos					
	VPL (R\$ ha ⁻¹)	TIR (%)	B/C	VPL (R\$ ha ⁻¹)	TIR (%)	B/C
	Com crédito de carbono			Sem crédito de carbono		
Sucessão trigo/soja	2.587,69	9	1,11	2.587,69	9	1,11
Rotação trigo/soja-trigo/soja - trigo/milho	1.513,87	4	1,11	1.513,87	4	1,11
Pinus solteiro para serraria	2.994,31	14	1,63	2.604,10	14	1,55
Pinus solteiro para serraria + milho	3.852,87	17	1,66	3.462,05	17	1,59
Eucalipto solteiro para celulose	6.929,05	25	2,12	6.481,96	24	2,17
Eucalipto solteiro para celulose + milho	8.392,61	30	2,24	7.945,53	30	2,06
Eucalipto solteiro para serraria	3.006,13	15	1,53	2.597,63	15	1,46
Eucalipto solteiro para serraria + milho	3.689,25	17	1,55	3.455,57	17	1,52

O cenário que contempla a rotação de culturas trigo/soja – trigo/soja – trigo/milho foi o que apresentou menor viabilidade econômica de acordo com todos os indicadores analisados. Por outro lado, o cultivo do eucalipto com rotação de sete anos para produção de celulose em consórcio com o milho, foi o mais rentável, promovendo um retorno financeiro de R\$ 7.945,53 ha⁻¹ e 8.392,61 ha⁻¹ com e sem os créditos de carbono, respectivamente (Tabela 4). O retorno financeiro promovido pela sucessão de culturas trigo/soja foi em média 70% superior ao sistema de rotação de culturas trigo/soja – trigo/soja – trigo/milho.

A inclusão dos créditos de carbono aos cenários florestais com *Pinus taeda* solteiro e consorciado com o milho promoveu um incremento no VPL de, respectivamente, 14% e 11%, quando comparado ao cenário sem os créditos. Com relação aos cenários envolvendo o plantio de *Eucalyptus grandis*, o aumento da viabilidade proporcionada pelos créditos foi de 7% no cenário manejado para celulose, 5% no cenário “eucalipto para celulose + milho”, 15% no cenário “eucalipto manejado para serraria” e 9% no cenário “eucalipto para serraria + milho” (Tabela 4).

A inclusão do milho nos dois primeiros anos de cada rotação no cenário manejado para produção de madeira para celulose proporcionou um acréscimo 23% no VPL. No caso do manejo para serraria, o incremento foi de, respectivamente, 33% e 32% nos cenários com eucalipto e pinus. Renner (2004) analisando a viabilidade econômica de cenários com *Pinus taeda* para geração de créditos de carbono, com diferentes regimes de manejo, taxa de juros de 9% a.a. e venda do crédito a U\$ 5,00, encontrou valores de VPL variando de R\$2.314,00 a R\$4.020,17.

Quando analisada a viabilidade dos cenários de projeto pelo critério TIR (Tabela4) verificou-se que os sistemas de sucessão trigo/soja e de rotação trigo/soja – trigo/soja – trigo/milho, apresentaram TIR inferiores ao custo de oportunidade do capital considerado neste estudo, que foi de 10%, caracterizando-os como menos atrativo. Por outro lado, os demais cenários apresentaram TIR superiores à taxa de 10% ao ano, comprovando assim a viabilidade financeira. Segundo o critério B/C, todos os cenários mostraram-se rentáveis, pois foram superiores a 1 (Tabela 4).

De acordo com os resultados obtidos pode-se inferir que o plantio de florestas comerciais com pinus e eucalipto constituem alternativas de uso da terra com maior rentabilidade econômica que os sistemas agrícolas analisados. Rentabilidade essa que aumenta com os créditos de carbono. Apesar de as receitas advindas dos créditos serem inicialmente modestas, estas podem se tornar mais significativas à medida que os custos para emissão dos créditos forem reduzidos ou diluídos. Segundo Rodigheri et al. (2005) uma das formas de se conseguir essa diluição seria através de formação de associações pelos pequenos produtores, de modo a obter uma escala suficiente de produção. Estudos realizados por Dossa et al. (2000), Ribaski et al. (2005), Rodigheri et al. (2005) constataram competitividade e viabilidade de sistemas florestais, agroflorestais e silvipastoris quando comparados com atividades de produção agrícola ou pecuária no estado do RS.

Sendo assim, os cenários florestais com eucalipto e pinus analisados, além de gerarem créditos de carbono, podem constituir em mais uma alternativa econômica de incentivo à expansão dos plantios florestais na região de Passo Fundo e de Frederico Westphalen e, conseqüentemente, contribuir para o fortalecimento das pequenas propriedades rurais e para a conservação dos recursos naturais daquela região.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

– O cenário com *Eucalyptus grandis* com rotação de sete anos e três ciclos de corte, manejado para produção de celulose foi o que apresentou maior capacidade de sequestro de carbono e conseqüentemente foi o que gerou maior número de Reduções Certificadas de Emissões.

– Dentre os cenários manejados para produção de madeira serrada, com rotação de 21 anos e dois desbastes, o cultivo do pinus proporcionou maior número de Reduções Certificadas de Emissões.

– Os cenários florestais avaliados apresentaram maior viabilidade econômica comparativamente aos sistemas de sucessão de culturas trigo/soja e de rotação trigo/soja - trigo/soja/ - trigo/milho implantados atualmente na região.

– A inclusão do milho nos dois primeiros anos do consórcio com as espécies florestais proporcionou um acréscimo 23% no VPL no cenário do eucalipto manejado para celulose e de, respectivamente, 33% e 32% nos cenários com eucalipto e pinus manejados para serraria.

– A inclusão dos créditos de carbono aos cenários florestais com *Pinus taeda* solteiro e consorciado com o milho promoveu um aumento no VPL de, respectivamente, 14% e 11%,

– Nos cenários com *Eucalyptus grandis*, o aumento da rentabilidade proporcionada pelos créditos foi de 7% no cenário manejado para celulose, 5% no cenário “celulose + milho”, 15% no cenário “eucalipto para serraria” e 9% no cenário “eucalipto para serraria + milho”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Crítérios de elegibilidade e indicadores de sustentabilidade para avaliação de projetos que contribuam para a mitigação das mudanças climáticas e para a promoção do desenvolvimento sustentável.** Brasília, 2002. 17 p.
- CEPEA - Centro de Estudos em Economia Aplicada. Indicadores de preços. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/>>. Acesso em: 24 maio 2010.
- CONAB - Companhia Nacional De Abastecimento. Custos de produção. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=545&t=2>>. Acesso em: 24 maio 2010.
- CUNHA, G.R.; MALUF, J. R. T.; HASS, J. C.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M. B. M. Mapeamento de risco de deficiência hídrica para soja no Rio Grande do Sul. In: CUNHA, G. R. **Lidando com Riscos Climáticos: clima, sociedade e agricultura.** Passo Fundo: Embrapa trigo, 2004. p. 245-272.
- DOSSA, D.; VILCAHUAMAN, L. J. M. **A atividade florestal e agroflorestal como alternativas de renda aos produtores rurais.** Colombo: CNPF-Embrapa, 2001. 6 p. (Circular Técnica, 53).
- DOSSA, D.; DA SILVA, H. D.; BELLOTE, A. F. J.; RODIGHIERI, H. R. **Produção e rentabilidade do eucaliptos em empresas florestais.** Colombo: Embrapa Florestas, 2002. 4 p. (Comunicado Técnico, 82).
- ECOSYSTEM MARKETPLACE. Forest Trends. **State of forest carbon markets 2011: From canopy to currency.** [DIAZ, D.; HAMILTON, K.; JOHNSON, E. (Ed.)]. [S.l.: s.n.], 2011. 70 p. Disponível em: <http://www.foresttrends.org/publication_details.php?publicationID=2963>. Acesso em: 13 set. 2012.
- FERNANDES, L. A. V. Customização da ferramenta “TARAM” para projetos florestais de MDL com *Pinus taeda* L. no extremo sul do Paraná. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. 146 p. 2010.
- FLEIG, F. D.; SCHNEIDER, P. R.; BRUM, E. T. Análise econômica do sistema de produção com acacia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) no Rio Grande do Sul. *Scientia Florestali*, Santa Maria, v.3, n.1, p. 203-240, 1993.
- GRAÇA, L.R.; RODIGHIERI, H. R.; CONTO, A. J. DE. Custos florestais de produção: conceituação e aplicação. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 32p. (Embrapa Florestas. Documentos, 50).
- HILDEBRANDT, P.; KIRCHLECHNER, P.; HAHN, A.; KNOKE, T.; MUJICA, R. H. Mixed species plantations in Southern Chile and the risk of timber price fluctuation. **European Journal Forest Reserch**, v. 129, n. 5, p. 935-946, 2010.
- HIRAKURI, M. H.; LAZZAROTTO, J. J. **Avaliação econômica da produção de soja nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, para a safra 2009/10.** Londrina: Embrapa Soja, 2009. 16 p. (Circular Técnica, 71).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agrícola Municipal (1990 - 2010). SIDRA: Agricultura. 2011. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 2 out. 2011.

IMF - International Monetary Fund. Comodity prices. Disponível em: <<http://www.imf.org/>>. Acesso em: 24 abr. 2010.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry**. [PENMAN, J.; GYTARSKY, M.; HIRAISHI, T.; KRUG, T.; KRUGER, D.; PIPATTI, R.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE K.; WAGNER, F.(Ed.)]. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2003. National Greenhouse Gas Inventories Programme. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf >. Acesso em: 12 fev. 2008.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, forestry and other land use**. [EGGLESTON, H.S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA T.; TANABE, K (Ed.)]. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006. vol. 4. National Greenhouse Gas Inventories Programme. Disponível em: < <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>>. Acesso em: 12 fev. 2008.

LIMA JÚNIOR, V. B. **Determinação da taxa de desconto para uso na avaliação de projetos de investimentos florestais**. 1995. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

MONIZ, C. V. D. Comportamento inicial do eucalipto (*Eucalyptus torelliana* F. Muell), em plantio consorciado com milho (*Zea mayz* L.), no Vale do Rio Doce, em Minas Gerais. 1987. 48 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

OLIVEIRA, E. **Um sistema computadorizado de prognose do crescimento e produção de pinus com critérios quantitativos para avaliação técnica e econômica de regimes de manejo**. 1995. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)–Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

RADAR SILVICONSLT. Curitiba: Silviconsult Consultoria em Negócios Florestais e Gestão Socioambiental , 2010. Ano 2, Edição 2.

RENNER, R. M Seqüestro de carbono e a viabilização de novos reflorestamentos no Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. 2004.147p.

REZENDE, J. L. P.; OLIVEIRA, A. D. Problemas com o horizonte de planejamento na avaliação de projetos florestais. **Revista Árvore**, v. 24, n. 2, p. 127-134, 2000.

RIBASKI, J.; DEDECEK, R. A.; MATTEI, V. L.; FLORES, C. A.; VARGAS, A. F. C.; RIBASKI S. A. G. **Sistemas silvipastoris: estratégias para o desenvolvimento rural sustentável para a metade sul do estado do Rio Grande do Sul**. Colombo: Embrapa Florestas. 2005. 8 p. (Comunicado Técnico, 150).

RODIGHERI, H. R. **Rentabilidade econômica comparativa entre plantios florestais e sistemas agroflorestais com erva-mate, eucalipto e pinus e as culturas do feijão, milho, soja e trigo.** Colombo: Embrapa-CNPQ, 1997. 36 p. (Circular Técnica, 26).

RODIGHERI, H. R.; GRAÇA, L. R.; LIMA, M. A. **Indicadores de custos, produtividade, renda e créditos de carbono de plantios de eucaliptos e pinus em pequenas propriedades rurais.** Colombo: Embrapa Florestas, 2005. 8 p. (Comunicado Técnico, 135).

SCHELHAAS, M. J.; VAN ESCH, P. W.; GROEN, T. A.; JONG, B. H. J.; KANNINEN, M.; LISKI, J.; MASERA, O.; MOHREN, G. M. J.; NABUURS, G. J.; PALOSUO, T.; PEDRONI, L.; VALLEJO, A.; ANDVILN, T. **CO₂FIX V 3.1 manual: a modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems.** Wageningen: [s.n.], 2004. 122 p. Alterra-repport 1068.

UNDP - United Nations Development Programme. **The clean development mechanism: an assessment of progress.** NASA / VW, 2006. 168 p.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Decision 19/CP.9: Modalities and procedures for afforestation and reforestation project activities under the clean development mechanism in the first commitment period of the Kyoto Protocol.** 2003. Disponível em: <<http://www.unfccc.int/documentation/decisions>>. Acesso em: 16 abr. 2007.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Formulário do documento de concepção do projeto para atividades de projetos de florestamento e reflorestamento (CDM-AR-PDD) - versão 04.** [S.l.: s.n.], 2009. 231 p. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0200/200628.pdf>. Acesso em: 15 de set. 2010.

APÊNDICE 1

Remoção antrópica líquida (RAL) de gases de efeito estufa (GEE) resultante do projeto de reflorestamento; Remoção real líquida no cenário de projeto (RR_{CP}), Remoção real líquida no cenário de linha de base (RR_{LB}) e Fugas (F).

1.1. Cenário com plantio de *Eucalyptus grandis* para celulose

Ano	RR _{CP}				RR _{LB}	F	RAL	RCE (Unidade)
	Estoque Total	Colheita Tronco	COLHEITA (F+G+R)	Emissão de GEE				
(ton CO ₂ eq ha ⁻¹ ano ⁻¹)								
0	0,00	0,00	0,00	31,17	0,00	0,00	-31,17	
1	2,33	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,48	
2	46,66	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	12,56	
3	114,30	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	30,99	
4	175,10	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	47,55	
5	226,99	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	61,69	
6	270,33	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	73,50	
7	305,01	257,96	47,05	0,16	0,00	0,00	46,89	46,89
8	35,43	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	9,50	
9	70,43	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	19,03	
10	122,14	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	33,12	
11	167,87	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	45,58	
12	209,37	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	56,89	
13	247,16	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	67,19	
14	278,70	232,16	46,54	0,16	0,00	0,00	46,38	46,38
15	39,29	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	10,55	
16	69,18	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	18,69	
17	114,96	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	31,17	
18	157,35	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	42,72	
19	195,67	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	53,16	
20	229,39	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	62,35	
21	257,78	208,91	48,87	0,16	0,00	0,00	48,71	48,71

RR_{CP}: Remoção real de GEE no cenário de projeto; RR_{LB}: Remoção real de GEE no cenário de linha de base; F: Fugas; RAL: Remoção antrópica líquida de GEE promovida pelo projeto; RCE: Redução Certificada de Emissão; (F+G+R): Folhas + Galhos+ Raizes.

1.2. Cenário com plantio de *Eucalyptus grandis* para serraria

Ano	RR _{CP}				RR _{LB}	F	RAL	RCE (Unidade)
	Estoque Total	Colheita Tronco	COLHEITA (F+G+R)	Emissão de GEE				
	(ton CO ₂ eq ha ⁻¹ ano ⁻¹)							
	0,00	0,00	0,00	31,17	0,00	0,00	-31,17	
1	2,31	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	2,15	
2	46,66	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	46,50	
3	114,32	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	114,16	
4	175,08	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	174,92	
5	226,97	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	226,81	
6	270,33	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	270,17	
7	204,68	87,46	31,25	0,16	0,00	0,00	31,09	31,09
8	220,90	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	220,74	
9	244,92	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	244,76	
10	265,91	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	265,75	
11	284,33	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	284,17	
12	174,36	114,06	18,88	0,16	0,00	0,00	18,72	18,72
13	204,75	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	204,59	
14	218,22	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	218,06	
15	230,33	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	230,17	
16	240,88	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	240,72	
17	249,95	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	249,79	
18	257,63	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	257,47	
19	263,89	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	263,73	
20	269,08	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	268,92	
21	273,58	260,53	16,07	0,16	0,00	0,00	15,91	15,91

RR_{CP}: Remoção real de GEE no cenário de projeto; RR_{LB}: Remoção real de GEE no cenário de linha de base; F: Fugas; RAL: Remoção antrópica líquida de GEE promovida pelo projeto; RCE: Redução Certificada de Emissão; (F+G+R): Folhas + Galhos+ Raizes.

1.3. Cenário com plantio de *Pinus taeda* para serraria

Ano	RR _{CP}				RR _{LB}	F	RAL	RCE (Unidade)
	Estoque Total	Colheita Tronco	COLHEITA (F+G+R)	Emissão de GEE				
(ton CO ₂ eq ha ⁻¹ ano ⁻¹)								
0	0,00	0,00	0,00	31,17	0,00	0,00	-31,17	
1	0,13	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,05	
2	0,59	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,51	
3	7,10	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	7,02	
4	27,69	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	27,61	
5	64,30	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	64,22	
6	107,26	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	107,18	
7	152,47	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	152,39	
8	197,10	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	197,02	
9	178,07	39,69	35,43	0,08	0,00	0,00	35,35	35,35
10	211,87	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	211,79	
11	244,75	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	244,67	
12	276,31	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	276,23	
13	173,68	88,08	41,91	0,08	0,00	0,00	41,83	41,83
14	200,77	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	200,69	
15	225,12	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	225,04	
16	248,02	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	247,94	
17	269,98	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	269,90	
18	291,14	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	291,06	
19	311,64	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	311,56	
20	331,58	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	331,50	
21	350,98	291,95	69,44	0,08	0,00	0,00	69,36	69,36

RR_{CP}: Remoção real de GEE no cenário de projeto; RR_{LB}: Remoção real de GEE no cenário de linha de base; F: Fugas; RAL: Remoção antrópica líquida de GEE promovida pelo projeto; RCE: Redução Certificada de Emissão; (F+G+R): Folhas + Galhos+ Raizes.

Apêndice 2 – Custos de implantação e manutenção dos povoamentos florestais com *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* sem os créditos de carbono

Ano	Cenários com <i>Eucalyptus grandis</i>						Cenários com <i>Pinus taeda</i>					
	EC		EC+M		ES		ES + Milho		PS		PS + Milho	
	Custo (R\$ ha ⁻¹)	Receita (R\$ ha ⁻¹)	Custo (R\$ ha ⁻¹)	Receita (R\$ ha ⁻¹)	Custo (R\$ ha ⁻¹)	Receita (R\$ ha ⁻¹)	Custo (R\$ ha ⁻¹)	Receita (R\$ ha ⁻¹)	Custo (R\$ ha ⁻¹)	Receita (R\$ ha ⁻¹)	Custo (R\$ ha ⁻¹)	Receita (R\$ ha ⁻¹)
0	2.089,20		2.682,30	1.042,50	2.089,20		2.682,30	1.042,50	1.773,70		2.366,80	1.042,50
1	527,25		1.120,35	1.042,50	527,25		1.120,35	1.042,50	409,90		1.003,00	1.042,50
2	527,25		527,25		560,25		560,25		409,90		409,90	
3	296,25		296,25		329,25		329,25		277,90		277,90	
4	296,25		296,25		395,25		395,25		541,90		541,90	
5	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
6	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
7	706,50	13.943,34	706,50	13.943,34	706,50	4.769,66	706,50	4.769,66	277,90		277,90	
8	527,25		1.120,35	1.042,50	527,25		527,25		277,90	1.364,51	277,90	1.364,51
9	296,25		889,35	1.042,50	296,25		296,25		541,90		541,90	
10	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
11	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
12	296,25		296,25		296,25	8.678,22	296,25	8.890,26	277,90	6.289,35	277,90	6.289,35
13	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
14	706,50	12.665,16	706,50	12.665,16	706,50		706,50		277,90		277,90	
15	527,25		1.120,35	1.042,50	527,25		527,25		277,90		277,90	
16	296,25		889,35	1.042,50	296,25		296,25		277,90		277,90	
17	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
18	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
19	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
20	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
21	296,25	11.289,78	296,25	11.289,78	296,25	22.485,48	296,25	22.485,48	277,90	34.500,79	277,90	34.500,79

EC: Eucalipto para celulose; EC+M: Eucalipto para celulose consorciado com milho; ES: Eucalipto para serraria; ES+M: Eucalipto para serraria consorciado com milho; PS: Pinus para serraria; PS+M: Pinus para serraria consorciado com milho

Apêndice 3 – Custos de implantação e manutenção dos povoamentos florestais com *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* com os créditos de carbono

Ano	Cenários com <i>Eucalyptus grandis</i>						Cenários com <i>Pinus taeda</i>					
	EC		EC+M		ES		ES + Milho		PS		PS + Milho	
	Custo (R\$ ha ⁻¹)	Receita (R\$ ha ⁻¹)	Custo (R\$ ha ⁻¹)	Receita (R\$ ha ⁻¹)	Custo (R\$ ha ⁻¹)	Receita (R\$ ha ⁻¹)	Custo (R\$ ha ⁻¹)	Receita (R\$ ha ⁻¹)	Custo (R\$ ha ⁻¹)	Receita (R\$ ha ⁻¹)	Custo (R\$ ha ⁻¹)	Receita (R\$ ha ⁻¹)
0	2.129,91		2.723,01	1.042,50	2.129,91		2.723,01	1.042,50	1.814,41		2.406,90	1.042,50
1	527,25		1.120,35	1.042,50	527,25		1.120,35	1.042,50	409,90		1.003,00	1.042,50
2	527,25		527,25		560,25		560,25		409,90		409,90	
3	296,25		296,25		329,25		329,25		277,90		277,90	
4	296,25		296,25		395,25		395,25		541,90		541,90	
5	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
6	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
7	706,50	14.476,86	706,50	14.476,86	706,50	5.124,08	706,50	5.124,08	277,90		277,90	
8	527,25		1.120,35	1.042,50	527,25		527,25		277,90	1.766,93	277,90	1.766,93
9	296,25		889,35	1.042,50	296,25		296,25		541,90		541,90	
10	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
11	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
12	296,25		296,25		296,25	9.440,31	296,25	9.440,31	277,90	6.765,86	277,90	6.785,86
13	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
14	706,50	13.192,98	706,50	13.192,98	706,50		706,50		277,90		277,90	
15	527,25		1.120,35	1.042,50	527,25		527,25		277,90		277,90	
16	296,25		889,35	1.042,50	296,25		296,25		277,90		277,90	
17	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
18	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
19	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
20	296,25		296,25		296,25		296,25		277,90		277,90	
21	296,25	11.844,96	296,25	11.844,96	296,25	22.666,86	296,25	22.666,86	277,90	35.176,81	277,90	35.176,81

EC: Eucalipto para celulose; EC+M: Eucalipto para celulose consorciado com milho; ES: Eucalipto para serraria; ES+M: Eucalipto para serraria consorciado com milho; PS: Pinus para serraria; PS+M: Pinus para serraria consorciado com milho

CONCLUSÃO GERAL

Diante da hipótese geral mencionada no início deste trabalho “de que a conversão de áreas de produção de soja, sujeitas a quebras de produtividade no RS, em florestas para geração de créditos de carbono constitui uma alternativa viável sob o ponto de vista econômico e ambiental” pode se concluir que:

- A sobreutilização das terras é um importante fator de quebra de produtividade das culturas de grãos para cerca de 30% das terras avaliadas em Frederico Westphalen.

- As áreas avaliadas em Passo Fundo apresentaram maior capacidade de estocagem de carbono tanto nos cenários agrícolas quanto florestais, enquanto que as áreas em Frederico Westphalen apresentaram maior incidência e susceptibilidade à degradação ambiental, principalmente no que se refere aos riscos de erosão.

- O cenário que contempla o plantio de eucalipto para celulose, com três rotações de sete anos foi o que apresentou maior capacidade de geração de Reduções Certificadas de Emissões. Entretanto, considerando o tempo de armazenamento do carbono no reservatório “biomassa florestal” e o retorno desse carbono para a atmosfera em forma de emissão de GEE, o cenário que contempla o plantio de pinus com rotação de 21 anos torna-se mais interessante sob o ponto de vista ambiental.

- Em termos econômicos todos os cenários florestais avaliados apresentaram melhores retornos econômicos comparativamente aos sistemas de sucessão e de rotação de grãos envolvendo a cultura da soja, constituindo assim, alternativas viáveis para a conversão.

- A renda adicional promovida pela venda dos créditos de carbono dos sistemas florestais pode atuar como um incentivo à adoção desta atividade pelos produtores de soja.

- O plantio de florestas comerciais, incluindo a geração de créditos de carbono, constitui uma alternativa de uso da terra que pode promover rendas adicionais ao produtor e maior proteção dos recursos naturais, sobretudo nas áreas onde o uso está em desacordo com a aptidão agrícola.