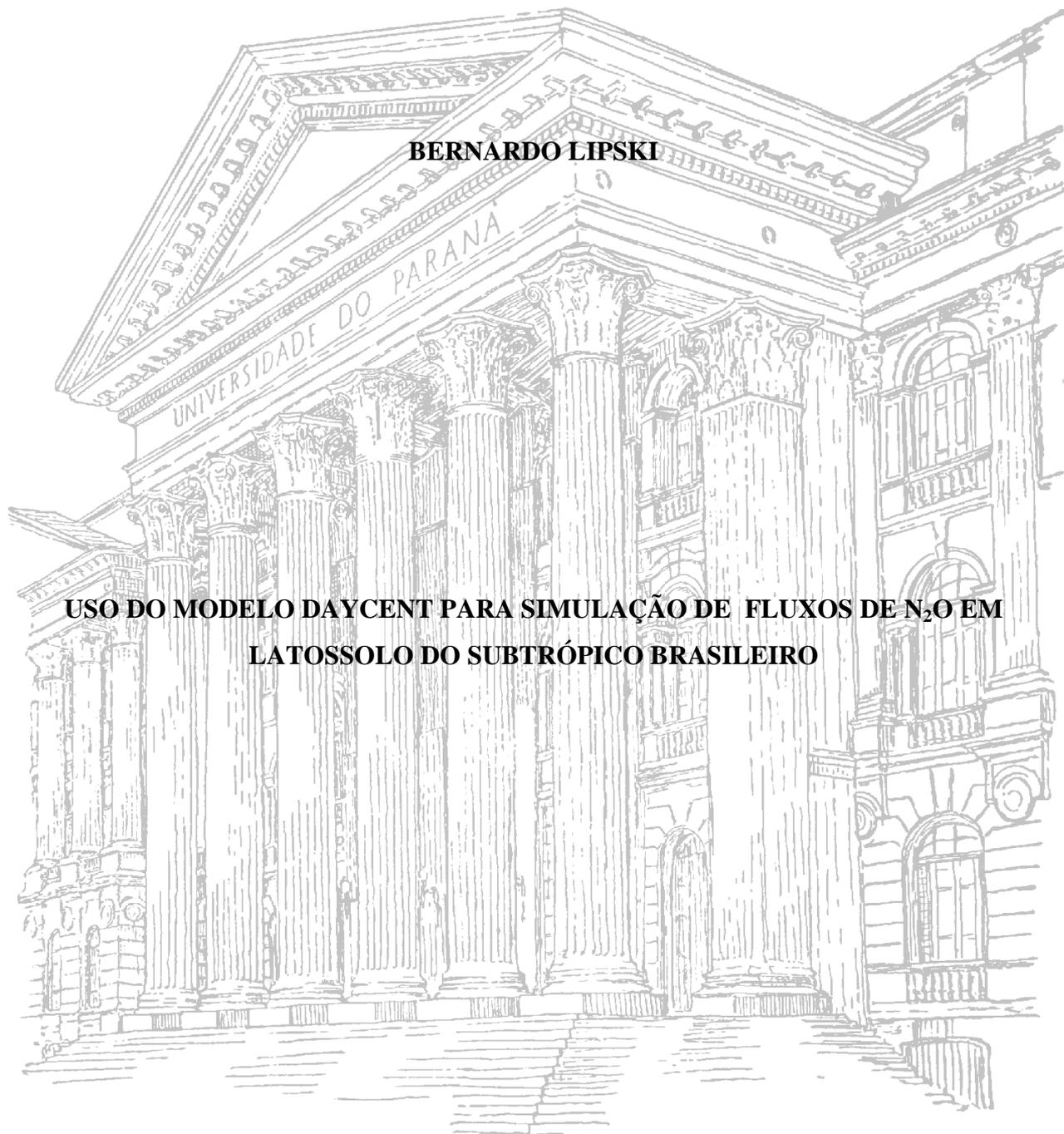


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

BERNARDO LIPSKI

**USO DO MODELO DAYCENT PARA SIMULAÇÃO DE FLUXOS DE N₂O EM
LATOSSOLO DO SUBTRÓPICO BRASILEIRO**



CURITIBA

2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

BERNARDO LIPSKI

**USO DO MODELO DAYCENT PARA SIMULAÇÃO DE FLUXOS DE N₂O EM
LATOSSOLO DO SUBTRÓPICO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Jeferson Dieckow

Co-orientador: Prof. Marco Aurélio
Mello Machado

CURITIBA

2013



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO
Mestrado e Doutorado



PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **BERNARDO LIPSKI**, intitulada: “**Uso do modelo Daycent para simulação de fluxos de N₂O em Latossolo do subtropical brasileiro**”, do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição do candidato, emitem parecer pela “**APROVAÇÃO**” da referida Dissertação. O candidato atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 30 de julho de 2013.

Prof. Dr. Jeferson Dieckow, Presidente

Dr^a. Josiléia Acordi Zanatta, I^a. Examinadora

Prof. Dr. Volnei Pauletti, II^o. Examinador

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, José Roberto Lipski e Terezinha Bernadete Lipski, pelo apoio e incentivo concedido ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, José Roberto Lipski e Terezinha Bernadete Lipski, pelo carinho, amor, compreensão e educação.

À minha irmã, Bianca Lipski, pela sua eterna amizade.

A minha namorada, Amanda Cristina de Souza Fraga, que me acompanhou durante toda essa caminhada.

Aos meus amigos, André Victor Stigar, Jonathan Rafael Campos, Emmanuel Omiro, Rafael Serta, Maria Marta e Juliana Pillato pelos momentos de descontração e alegrias proporcionados nos tempos livres.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação pelo desenvolvimento profissional e ensinamentos.

Ao Jeferson Dieckow pelos seus conhecimentos e contribuições oferecidas.

Ao Marco Aurélio de Mello Machado pela paciência, dedicação, incentivos e pelas conversas ao longo desta jornada.

Ao Lactec, pelo apoio oferecido para realização deste trabalho, em especial a Akemi Kan, pelas conversas e conselhos da vida.

A CAPES pela concessão parcial da bolsa de estudo.

USO DO MODELO DAYCENT PARA SIMULAÇÃO DE FLUXOS DE N₂O EM LATOSSOLO DO SUBTRÓPICO BRASILEIRO¹

Autor: Bernardo Lipski

Orientador: Prof. Jeferson Dieckow

Co-Orientador: Prof. Marco Aurélio de Mello Machado

RESUMO

Solos agrícolas podem atuar como fonte ou dreno de gases de efeito estufa (GEE) conforme o uso e manejo. Os processos envolvidos na emissão de GEE podem ser simulados por modelos desde que estes sejam calibrados e validados. A literatura indica que o modelo Daycent permite simular fluxos diários de N₂O, a partir do solo, em sistemas agrícolas de climas temperados. Contudo, são escassos os estudos sobre uso do Daycent em sistemas agropecuários de clima tropical e subtropical. O objetivo deste trabalho foi calibrar e validar o modelo Daycent para estimar emissões de N₂O na região dos Campos Gerais, estado do Paraná. Foram utilizadas informações de emissão obtidas em experimento de longa duração com três sistemas de culturas sob plantio direto (PD): trigo-soja, aveia preta-milho-trigo-soja e ervilhaca-milho-trigo-soja. Foram simuladas todas as práticas de manejos aplicadas nos sistemas, desde campo nativo (CN) até o sistema atual. Foram inseridos no modelo dados de solo (textura, pH, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, condutividade hidráulica e densidade aparente) e de clima (temperatura e precipitação diárias). Inicialmente, foi calibrada e avaliada a adição de carbono (C) por culturas e sistemas e, a seguir, estimados os estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo, para posterior avaliação dos fluxos de N₂O. O modelo Daycent simulou adequadamente as adições de C, por cultura e por sistemas de culturas, tendo subestimado os estoques de COT e NT quando em comparação com os dados observados. O modelo Daycent se mostrou sensível aos efeitos de precipitação e adubação nitrogenada nas emissões diárias de N₂O, entretanto, o modelo subestimou as emissões diárias.

Palavras-chave: Óxido nitroso, gases de efeito estufa, plantio direto, calibração e validação.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (39 p.) Setembro, 2013.

USE OF THE DAYCENT MODEL TO SIMULATE N₂O FLUXES IN LATOSSOL OF THE BRAZILIAN SUBTROPIC²

Author: Bernardo Lipski

Advisor: Prof. Jeferson Dieckow

Co-Advisor: Prof. Marco Aurélio de Mello Machado

ABSTRACT

Agricultural soils can act as a source or sink of greenhouse gases (GHG) according to its use and management. The processes involved in the emission of greenhouse gases can be simulated by models since they are calibrated and validated. The literature indicates that the Daycent model allows the simulation of daily N₂O fluxes from soil in temperate agricultural systems. However, there are few studies on the use of Daycent in agricultural systems of tropical and subtropical climate. The purpose of this work was to calibrate and validate the Daycent model to estimate N₂O emissions in the region of Campos Gerais, Paraná. We used information obtained from emission long-term experiment with three cropping systems under no-tillage (NT): wheat-soy, oat-corn-wheat-soybean and vetch-corn-wheat-soybean. We simulated all managements practices applied in systems, from natural pasture (NP) to the current system. The input of the model is soil data (texture, pH, field capacity, wilting point, hydraulic conductivity and bulk density) and climate data (temperature and precipitation daily). Initially, the addition of carbon (C) for cultures and systems was calibrated and evaluated, then, inventories of total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) of the soil were estimated for subsequent evaluation of N₂O fluxes. The Daycent model adequately simulated additions of C, by crop and cropping systems, despite having underestimated the TOC stocks and NT when compared with the observed data. The Daycent model was sensitive to the effects of precipitation and nitrogen fertilization on the daily emissions of N₂O, however, the model underestimated daily emissions.

Key-Words: Nitrous oxide, greenhouse gases, no till, calibration and validation.

² Soil Science Master Dissertation. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (39p.) September, 2013.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	3
2.1 ÁREA DE ESTUDO	3
2.2 CENÁRIOS	3
2.2.1 Cenário I: Campo Nativo.....	4
2.2.2 Cenário II: Preparo Convencional	4
2.2.3 Cenário III: Sistemas de Culturas sob Plantio Direto.....	4
2.3 DADOS DE ENTRADA DO MODELO	5
2.3.1 Solo e clima	5
2.4 DADOS DE SAIDA DO MODELO DAYCENT	7
2.4.1 Adição de carbono	7
2.4.2 Estoques de carbono e nitrogênio no solo	8
2.4.3 Emissão de N ₂ O.....	8
2.5 Validação do modelo	9
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
3.1 ADIÇÃO DE CARBONO.....	10
3.2 ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO	17
3.3 EMISSÃO DE N ₂ O	24
4 CONCLUSÕES	32
5 LITERATURA CITADA	33

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Médias mensais das temperaturas do ar (mínima e máxima) e da precipitação do período de 1998 a 2011, registrados na estação meteorológica de Ponta Grossa, Paraná.....6
- Figura 2. Comparações entre as médias de resultados simulados e observados da adição de carbono (C), por cultura sob plantio direto, referentes ao período 1990-2003. Sendo: TG = trigo; SO = soja; MI = milho; AV = aveia preta e ER = ervilhaca..... 12
- Figura 3. Análises dos testes estatísticos de adição de carbono (C) por cultura, entre resultados simulados e observados, de acordo com: a) coeficiente de correlação (r); b) raiz quadrada do erro médio (RMSE); c) eficiência do modelo (EF); d) coeficiente de determinância (CD); e) erro relativo (E); f) diferença de médias (M); g) teste t da diferença de médias (t(m)) e h) número de amostras (n). Sendo: TG = trigo; SO = soja; MI = milho; AV = aveia preta e ER = ervilhaca..... 13
- Figura 4. Resultados simulados e observados da adição de carbono (C), por sistemas de culturas sob plantio direto. Sendo: TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca. 15
- Figura 5. Análises dos testes estatísticos de adição de carbono (C), por sistemas de culturas sob plantio direto, entre resultados simulados e observados, de acordo com: a) coeficiente de correlação (r); b) raiz quadrada do erro médio (RMSE); c) eficiência do modelo (EF); d) coeficiente de determinância (CD); e) erro relativo (E); f) diferença de médias (M); g) teste t da diferença de médias (t(m)) e h) número de amostras (n). Sendo: TG = trigo; SO = soja; MI = milho; AV = aveia preta e ER = ervilhaca. 16
- Figura 6. Simulação do histórico do estoque de carbono orgânico total (COT) na profundidade de 0-20 cm, desde campo nativo até os sistemas de culturas sob plantio direto. Sendo: CN = campo nativo; PC = preparo convencional; PD = plantio direto; TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca. 18

Figura 7. Estoques simulados e observados de carbono orgânico total (COT) na profundidade de 0-20 cm de um solo submetido a diferentes sistemas de culturas, no ano de 2010. Sendo: CN = campo nativo; PD = plantio direto; TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca. 19

Figura 8. Testes estatísticos do carbono orgânico total (COT), na profundidade de 0-20cm, por sistema de culturas sob plantio direto, entre resultados simulados e observados, de acordo com: a) coeficiente de correlação (r); b) raiz quadrada do erro médio (RMSE); c) eficiência do modelo (EF); d) coeficiente de determinância (CD); e) erro relativo (E); f) diferença de médias (M); g) teste t da diferença de médias (t(m)) e h) número de amostras (n). Sendo: PD = plantio direto; TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca. 21

Figura 9. Simulação do histórico do estoque de nitrogênio total (NT) na profundidade de 0-20 cm, desde campo nativo até os sistemas de culturas sob plantio direto. Sendo: CN = campo nativo; PC = preparo convencional; PD = plantio direto; TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca. 22

Figura 10. Estoques simulados e observados de nitrogênio total (NT) na profundidade de 0-20 cm de um solo submetido a diferentes sistemas de culturas, no ano de 2010. Sendo: CN = campo nativo; PD = plantio direto; TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca. 23

Figura 11. Fluxos de N₂O simulados (linha) e observados (círculos, com seus erros-padrão, n = 32) em 2010 e 2011, nos sistemas: a) PD TGSO; b) PD AVMITGSO; c) PD ERMITGSO. Setas indicam os eventos de colheita da SO (CS), plantio do TG (PT), adubação do TG (AT), colheita do TG (CT), plantio da SO (PS), plantio da AV (PA), colheita da AV (CA), plantio do MI (PM), adubação do MI (AM), plantio de ER (PE) e colheita de ER (CE). Em d) barras em preto indicam a precipitação diária. Sendo: PD = plantio direto; TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca. 25

Figura 12. Fluxos de N₂O por sistemas de culturas, entre resultados simulados e observados, de acordo com: a) coeficiente de correlação (r); b) raiz quadrada do erro médio (RSME); c) eficiência do modelo (EF); d) coeficiente de determinância (CD); e) erro relativo (E); f)

diferença de médias (M); g) teste t da diferença de médias (t(m)); h) falta de ajuste (LOFIT);
i) teste f da falta de ajuste (f(LOFIT)) e j) número de amostras (n). Sendo: PD = plantio
direto; TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca.....28

Figura 13. Resultados simulados e observados da emissão acumulada de N₂O, no intervalo de
um ano (2010 a 2011), por sistemas de culturas sob plantio direto. Sendo: PD = plantio direto;
TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca.31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Histórico de uso e manejo da área de estudo.....	5
Tabela 2. Granulometria e pH na camada 0 a 20 cm.....	6
Tabela 3. Adição anual média, simulada e observada, de carbono, pela parte aérea e raízes. .	11
Tabela 4. Análise dos resultados entre simulados e observados do estoque de nitrogênio total na profundidade de 0-20 cm, de todos os sistemas sob plantio direto e incluindo campo nativo.	24
Tabela 5. Análises dos resultados simulados e observados da emissão anual acumulada de N ₂ O, para os sistemas de culturas sob plantio direto.....	31

1 INTRODUÇÃO

A produção e emissão de gases de efeito estufa (GEE) resultam da atividade microbiológica de decomposição e mineralização da matéria orgânica, e depende também de condições ambientais, tais como temperatura e disponibilidade de água (Lang *et al.*, 2011). O produto da atividade respiratória de microorganismos e raízes é a emissão de CO₂ do solo para a atmosfera (Fang & Moncrieff, 1999). Já o N₂O é originado de processos microbiológicos de nitrificação e desnitrificação (Khalil *et al.*, 2004).

Os solos agrícolas podem atuar como fonte ou dreno (sumidouro) de GEE (Johnson *et al.*, 2005). O manejo do solo, bem como o tipo de cultura, o manejo de resíduos, as culturas de cobertura, as rotações, o preparo, a irrigação, a drenagem e a adubação, irão interagir com o estoque de carbono (COT) e de nitrogênio (NT) no solo e na emissão de GEE (Ajwa & Tabatabai, 1994; Paustian *et al.*, 1997), alterando as taxas de ciclagem e fluxos de COT e de NT no solo. Diferentes tipos de uso agrícola resultam em diferentes emissões de CO₂ e N₂O a partir do solo (Liu *et al.*, 2008; Siqueira Neto *et al.*, 2009; Coutinho *et al.*, 2010).

Os diferentes processos envolvidos na emissão e no fluxo de GEE, sob diferentes usos e manejos do solo, podem ser simulados por modelos. Os modelos são conjuntos de equações físico-matemáticas que buscam representar a realidade de um modo simplificado (Addiscott, 1993). Entretanto, para que uma equação reproduza a realidade é necessário realizar o ajuste de suas variáveis, a partir de parametrizações que compõem o processo de calibração (Rykiel, 1996).

A comparação entre os resultados obtidos pelas simulações com os dados observados é denominada de validação (Rykiel, 1996). Desta forma, é essencial que os modelos sejam calibrados e validados.

O modelo Daycent foi desenvolvido para simular, numa base temporal diária, a troca de C, nutrientes (N, P, S) e gases (CO₂, N₂O, NO_x, N₂) entre a atmosfera, o solo e as plantas (Parton *et al.*, 1998; Kelly *et al.*, 2000). Ele é oriundo do modelo Century, que simula em base temporal mensal, a dinâmica de C e N em longo prazo (Parton *et al.*, 1994). Contudo, o Daycent utiliza, tanto nos dados de entrada quanto nas saídas do modelo, informações diárias para a estimativa das emissões de GEE (Del Grosso *et al.*, 2001).

O Daycent tem se mostrado um modelo adequado e com razoável acurácia de validação para a estimativa de emissões de N₂O em ambientes de clima temperado, quer seja em sistemas de produção agrícola (Del Grosso *et al.*, 2005), sob plantio direto ou convencional (Del Grosso *et al.*, 2002), quer em áreas de pastagem (Abdalla *et al.*, 2010). Entretanto, ainda são escassos os estudos sobre o uso e a validação do Daycent para sistemas agropecuários sob climas tropicais e subtropicais, como os que prevalecem no Sul do Brasil.

Para ser inicializado, o modelo Daycent requer dados mínimos de entrada referentes aos atributos químicos e físicos do solo, ao clima local, bem como às características de manejo e uso do solo, tais como épocas de plantio e colheita, adubações, irrigação e práticas como o pastejo (Del Grosso *et al.*, 2001). Os dados de solo requeridos são a textura, a densidade aparente, a condutividade hidráulica saturada, a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Os dados climáticos mínimos são a precipitação pluvial e temperaturas do ar, máxima e mínima, diárias. Por fim, dados sobre o manejo se referem a informações sobre o histórico da área quanto a datas de plantio e de colheita, níveis de fertilização nitrogenada, bem como outros possíveis manejos.

O objetivo deste trabalho foi o de calibrar e validar o modelo Daycent para estimar as emissões de N₂O a partir do solo manejado em sistemas de culturas sob plantio direto, na região dos Campos Gerais, estado do Paraná, região sul do Brasil. O estudo foi vinculado ao

projeto de pesquisa P&D da ANEEL (PD-6491-0013/2009) intitulado “Avaliação de gases de efeito estufa (GEE) da área de influência de reservatório em construção (estudo de caso: Mauá)”.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O local do estudo localiza-se em uma área experimental da Fundação ABC para Assistência e Divulgação Técnica, às coordenadas de 25°00 S e 50°09' W, e altitude de 880 m, situada no município de Ponta Grossa, Paraná. O clima é caracterizado como Cfb, conforme a classificação de Köppen (Caviglione *et al.*, 2000), com precipitação média anual de 1517 mm e temperatura média anual de 17,8°C (Ramos *et al.*, 2009). O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico com textura franco argilosa (Molin, 2008).

2.2 CENÁRIOS

Para melhor reproduzir as condições locais foi necessário recriar o histórico da área, desde a vegetação nativa até a conversão para agricultura com os atuais manejos, de modo a permitir a simulação do estoque de carbono e nitrogênio. Desta forma, foram criados os cenários para cada sistema de culturas, que representam as principais atividades agrícolas ocorridas em cada época (Tabela 1). As informações referentes a práticas de adubações e manejos dos sistemas de culturas foram obtidas de arquivos da área experimental da Fundação ABC.

2.2.1 Cenário I: Campo Nativo

Este cenário se refere à vegetação de campo nativo (CN) o qual permaneceu no local de estudo até a década de 1960 quando foi convertido para agricultura sob sistema de preparo convencional (PC) (Santos *et al.*, 2011). Visando garantir que os estoques de carbono e nitrogênio sejam considerados estabilizados nos diversos compartimentos no solo (passivo, lento e ativo) foi estimado que este cenário representasse um período de 6000 anos, o que permitiu calcular os estoques de carbono e nitrogênio iniciais (linha base) e possibilitou a delimitação das condições de contorno para os próximos cenários, a envolver sistemas de produção agrícola.

2.2.2 Cenário II: Preparo Convencional

O cenário de Preparo Convencional (PC) é caracterizado pela sucessão anual de trigo - soja (TGSO), com a sucessão de trigo no inverno e soja no verão, sistema o qual permaneceu até o verão de 1989 (Molin, 2008; Santos *et al.*, 2011).

2.2.3 Cenário III: Sistemas de Culturas sob Plantio Direto

Este cenário é compreendido por sistemas de culturas sob plantio direto (PD), de longa duração, o qual foi implantado no inverno de 1989 com delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. Os sistemas estudados foram:

Trigo – Soja (PD TGSO): é um sistema anual, com sucessão de trigo no inverno e soja no verão, ambos para produção de grãos;

Aveia Preta – Milho – Trigo – Soja (PD AVMITGSO): é um sistema bi-anual de rotação de culturas com aveia preta para cobertura de inverno no primeiro ano, sendo dessecada com herbicida antes do cultivo de milho no verão. Trigo e soja são cultivados no segundo ano para produção de grãos.

Ervilhaca – Milho – Trigo – Soja (PD ERMITGSO): é uma rotação com ervilhaca para cobertura de inverno, sendo dessecada com herbicida antes da semeadura do milho para produção de grãos. No segundo ano, são cultivados trigo e soja, também para a produção de grãos.

Tabela 1. Histórico de uso e manejo da área de estudo.

Cenário	Período	Descrição ¹
I – CN	-4000 - 1964	Campo nativo
II – PC	1965 - 1988	PC TGSO: 73 kg N ha ⁻¹ (trigo)
III – PD	1989 - 2011	PD TGSO: 128 kg N ha ⁻¹ (trigo); PD AVMITGSO: 194 kg N ha ⁻¹ (milho) e 128 kg N ha ⁻¹ (trigo); PD ERMITGSO: 148 kg N ha ⁻¹ (milho) e 128 kg N ha ⁻¹ (trigo);

¹PC = preparo convencional do solo; PD = plantio direto; TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca.

Fonte: Arquivos da área experimental, Fundação ABC.

2.3 DADOS DE ENTRADA DO MODELO

2.3.1 Solo e clima

A textura e o pH do solo foram obtidos junto à Fundação ABC, para a profundidade de 0 a 20 cm (Tabela 2).

Tabela 2. Granulometria e pH na camada 0 a 20 cm.

Areia	Silte	Argila	pH
g kg ⁻¹			CaCl ₂
519	160	321	5,1

Fonte: Arquivos da área experimental, Fundação ABC.

A capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a condutividade hidráulica saturada do solo foram estimadas a partir da textura, de acordo com Saxton *et al.* (1986). A densidade aparente, às profundidades 0-5, 5-10 e 10-20 cm, obtidos em trincheiras, foi obtida de Albuquerque (2012).

Os dados de temperaturas do ar (máxima e mínima) e precipitação diária foram obtidos da estação meteorológica de Ponta Grossa, pertencente ao SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná), distante 27 km da região do estudo. A série histórica utilizada (Figura 1) compreendeu as médias mensais do período 1998-2011.

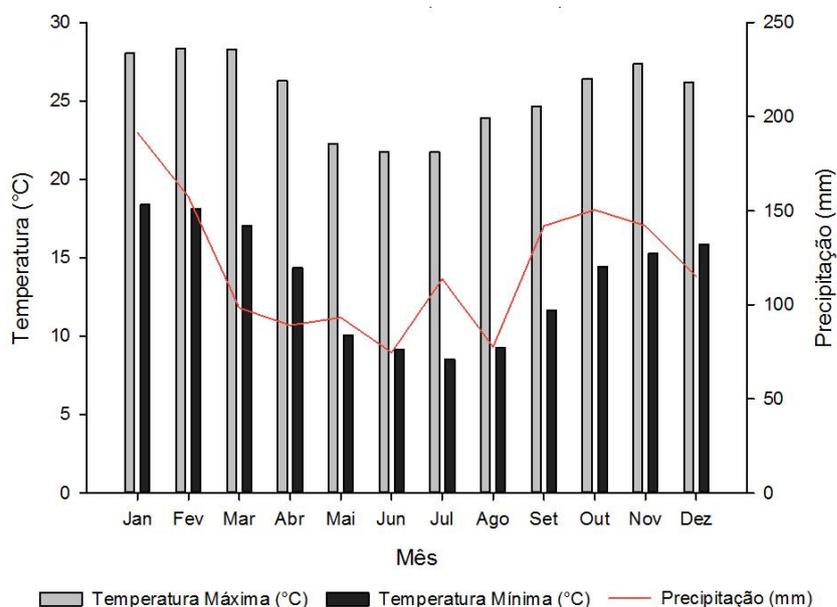


Figura 1. Médias mensais das temperaturas do ar (mínima e máxima) e da precipitação do período de 1998 a 2011, registrados na estação meteorológica de Ponta Grossa, Paraná.

2.4 DADOS DE SAIDA DO MODELO DAYCENT

Os processos de calibração foram conduzidos conforme Del Grosso *et al.* (2011) sendo avaliadas as adições simuladas de carbono pelas culturas, os estoques de carbono orgânico total (COT) e o nitrogênio total (NT), para posterior avaliação dos fluxos de N₂O em cada um dos sistemas de culturas em PD.

2.4.1 Adição de carbono

Para cada cultura foram calibrados os seus "PRDX", que expressam a produção da fitomassa da parte aérea em função da radiação solar. A calibração consistiu, portanto, na alteração dos valores originais deste atributo do modelo, e posterior verificação dos resultados das adições totais de carbono simuladas (somatório de fitomassa da parte aérea e de raízes) em comparação com os dados observados. Tal processo se fez por tentativa e erro, de modo que fosse obtida a melhor aproximação entre dados simulados e observados.

No cenário I, como não existem informações sobre adição de C para o CN, esta informação foi ajustada por comparação com os dados obtidos por Sá *et al.* (2001a) para estoque de COT. No cenário II, foram utilizados os rendimentos médios de grãos de soja e trigo para o estado Paraná, obtidos em SEAB (2009, 2010). No cenário III, todas as informações históricas detalhadas sobre rendimento de grãos de trigo, soja e milho, produção de matéria seca das coberturas de inverno, ervilhaca e aveia preta, foram obtidas de Molin (2008), para o período 1990 a 2003.

Para permitir a comparação entre adição de C pelas culturas com os dados observados (Molin, 2008; SEAB 2009, 2010) foram calculadas as adições conforme

procedimento sugerido por Bolinder *et al.* (2007), com alterações. Para a adição de resíduos pós-colheita, foram utilizados os índices de colheita de 0,30 para o trigo, 0,43 para a soja e 0,41 para o milho (Sisti *et al.*, 2004). Na adição de raízes por cultura foi considerada a produção da parte aérea, a relação parte aérea e raízes (A/R) e a produção extra de raízes. O fator de adição extra de raízes foi considerado como 0,65 da fitomassa radicular (Bolinder *et al.*, 2007) e as relações A/R para as culturas foram obtidas de Santos *et al.* (2011), quais sejam 2,7 para o trigo; 4,3 para a soja; 6,9 para o milho; 3,1 para aveia e 3,5 para a ervilhaca. A relação de concentração de C entre parte aérea e raízes foi considerada como sendo de 40% (Bayer *et al.*, 2000; Burle *et al.*, 1997).

2.4.2 Estoques de carbono e nitrogênio no solo

Após o ajuste do "PRDX" para cada cultura procedeu-se à avaliação dos estoques simulados de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) no solo, comparando-os com dados observados. No cenário I, foram utilizados os estoques de COT e NT conforme Sá *et al.* (2001a,b) para um campo nativo localizado no município de Tibagi. No cenário II, devido à falta de informações locais de estoques de COT e NT este cenário não foi avaliado. No cenário III, foram utilizados os estoques de COT para os anos de 2006, 2007 e 2010, a partir de Da-Silva *et al.* (2009), Santos *et al.* (2011) e Albuquerque (2012). Já os estoques de NT foram obtidos somente para o ano de 2010, segundo Albuquerque (2012).

2.4.3 Emissão de N₂O

A partir da obtenção dos estoques simulados de COT e NT foram avaliados os fluxos de N₂O para cada um dos sistemas em PD. Na análise do fluxo de N₂O foi recriado o ano de

2011 com as datas de plantio, colheita e adubação nitrogenada, para todas as culturas sob PD, o que possibilitou cotejamentos entre dados simulados e observados, obtidos sob as mesmas condições. Desta forma, dentro de cada um dos sistemas PD foi criado um bloco adicional no cenário III para simular o ano de 2011.

Os dados observados das emissões de N₂O em cada um dos sistemas PD foram obtidos de Albuquerque (2012) o qual utilizou duas câmaras de difusão em cada sistema de culturas, com três repetições. O período amostrado foi de 12/12/2010 a 12/12/2011, totalizando 32 medições. Dessa forma, os fluxos de N₂O do Daycent foram obtidos nos arquivos de saída do modelo pelo somatório da desnitrificação e nitrificação diárias.

2.5 Validação do modelo

O processo de validação do modelo Daycent consistiu no emprego de testes de avaliação dos submodelos de matéria orgânica, como o proposto por Smith *et al.* (1997). Foram avaliadas as adições totais de C das culturas, bem como os estoques de COT, NT e os fluxos de N₂O, pela comparação entre resultados simulados e observados.

Os indicadores de acurácia de validação do modelo foram os seguintes: coeficiente de correlação de Pearson (r) que indica se os valores simulados seguem o padrão dos valores observados, a raiz quadrada do erro médio (RMSE) que é um indicativo semelhante ao coeficiente de variação, o grau de eficiência do modelo (EF), que pode assumir valores negativos ou positivos e que descrevem a tendência dos dados observados, o coeficiente de determinância (CD), que é uma medida de proporção da variância total dos dados observados explicados pelos dados simulados, o erro relativo (E), que permite avaliar o viés ou a tendência da diferença entre dados simulados e observados e a diferença de médias (M) a 5%

de probabilidade, que avalia a natureza do viés da simulação. Os fluxos de N₂O foram analisados pelos mesmos testes citados, a intervalos de confiança de 95% do RMSE e do E, além do teste de falta de ajuste (LOFIT), a 5% de probabilidade. O LOFIT é um teste no qual o melhor ajuste se configura quanto menor o valor obtido.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ADIÇÃO DE CARBONO

A adição simulada de C na parte aérea do CN foi de 2,5 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 3), próxima à produção de uma pastagem de campo nativo no Rio Grande do Sul (2,14 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹) (Siewerdt *et al.*, 1995). No cenário II, as adições totais de C simuladas e observadas foram próximas (Tabela 3). Entretanto, em ambos os cenários (I e II), comparações estatísticas não foram feitas uma vez que os dados disponíveis se resumiam a uma única média do período. Desta forma, a análise para resultados simulados e observados ficou restrita ao cenário III, referente aos sistemas PD. Neste cenário, as adições de C simuladas e observadas foram próximas entre si, com as maiores diferenças observadas na cultura da aveia preta (AV) (Figura 2).

Tabela 3. Adição anual média, simulada e observada, de carbono, pela parte aérea e raízes.

Cenário	Sistema	Cultura	Adição pela Fitomassa da parte Aérea		Adição pela Fitomassa da parte de Raiz		Adição Total	
			Simulada	Observada	Simulada	Observada	Simulada	Observada
			-----Mg C ha ⁻¹ ano ⁻¹ -----					
I	CN	CN ⁴	2,5	-	3,7	-	6,1 ¹	-
-----Mg C ha ⁻¹ safra ⁻¹ -----								
II	PC TGSO	TG ⁵	1,1	1,0	0,5	0,6	1,6 ²	1,7
		SO ⁶	0,9	0,9	0,3	0,4	1,2 ²	1,3
III	PD TGSO	TG	2,1	2,0	1,1	1,2	3,3 ³	3,3
		SO	1,3	1,8	1,0	0,7	2,4 ³	2,4
	PD AVMITGSO	AV ⁷	1,6	2,4	1,2	1,3	2,8 ³	3,6
		MI ⁸	4,3	5,7	2,5	1,4	6,9 ³	7,0
		TG	2,1	2,2	1,1	1,3	3,2 ³	3,5
		SO	1,4	1,9	1,0	0,7	2,4 ³	2,6
	PD ERMITGSO	ER ⁹	1,2	2,0	1,0	0,9	2,2 ³	2,9
		MI	4,8	5,3	2,7	1,3	7,5 ³	6,6
TG		3,4	2,0	1,3	1,2	4,7 ³	3,3	
SO		1,5	1,9	1,0	0,7	2,6 ³	2,6	

¹Média de 1900 a 1964; ²média de 1966 a 1988; ³média de 1990 a 2003; ⁴campo

nativo; ⁵trigo; ⁶soja; ⁷aveia preta; ⁸milho; ⁹ervilhaca.

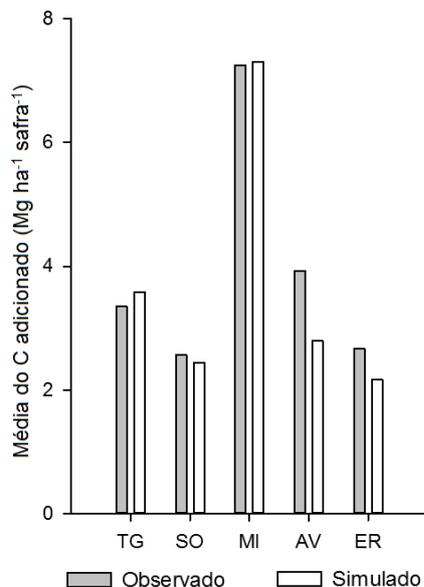


Figura 2. Comparações entre as médias de resultados simulados e observados da adição de carbono (C), por cultura sob plantio direto, referentes ao período 1990-2003. Sendo: TG = trigo; SO = soja; MI = milho; AV = aveia preta e ER = ervilhaca.

A análise do coeficiente de correlação não demonstrou tendência concordante entre dados simulados e observados, à exceção da ervilhaca (ER) (Figura 3a). Em relação a raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Figura 3b), observa-se que apesar de o trigo (TG) ter apresentado a menor diferença de médias, apresentou também o maior erro, devido a dificuldade do modelo em prever a adição por esta cultura. Tal fato pode ser creditado às frequentes instabilidades na produção da cultura causadas por geadas, não previstas pelo modelo. Sobre a eficiência do modelo (EF) (Figura 3c), a maioria das culturas apresentou valores negativos, o que indica que os dados simulados não descreveram bem os dados observados. Neste teste a melhor eficiência foi obtida para a cultura de ER. Já o coeficiente de determinância (CD) (Figura 3d), que analisa a proporção na qual os dados simulados explicam os dados observados a uma dada variância, observou-se que esse coeficiente foi ≥ 1 para a maioria das culturas, o que indica que a simulação adequou-se melhor na previsão das

adições, quando em comparação com os dados observados (Smith *et al.*, 1997). O viés entre dados observados e simulados foi testado com o erro relativo (E). O maior E foi verificado na cultura de aveia preta (AV), padrão verificado também ao se analisar a diferença de médias (M). Entretanto, apesar de existirem diferenças entre os resultados simulados e observados de AV e ER (Figura 3f) os resultados obtidos no teste t (Figura 3g) mostraram que as culturas estavam dentro do intervalo de probabilidade a 5%.

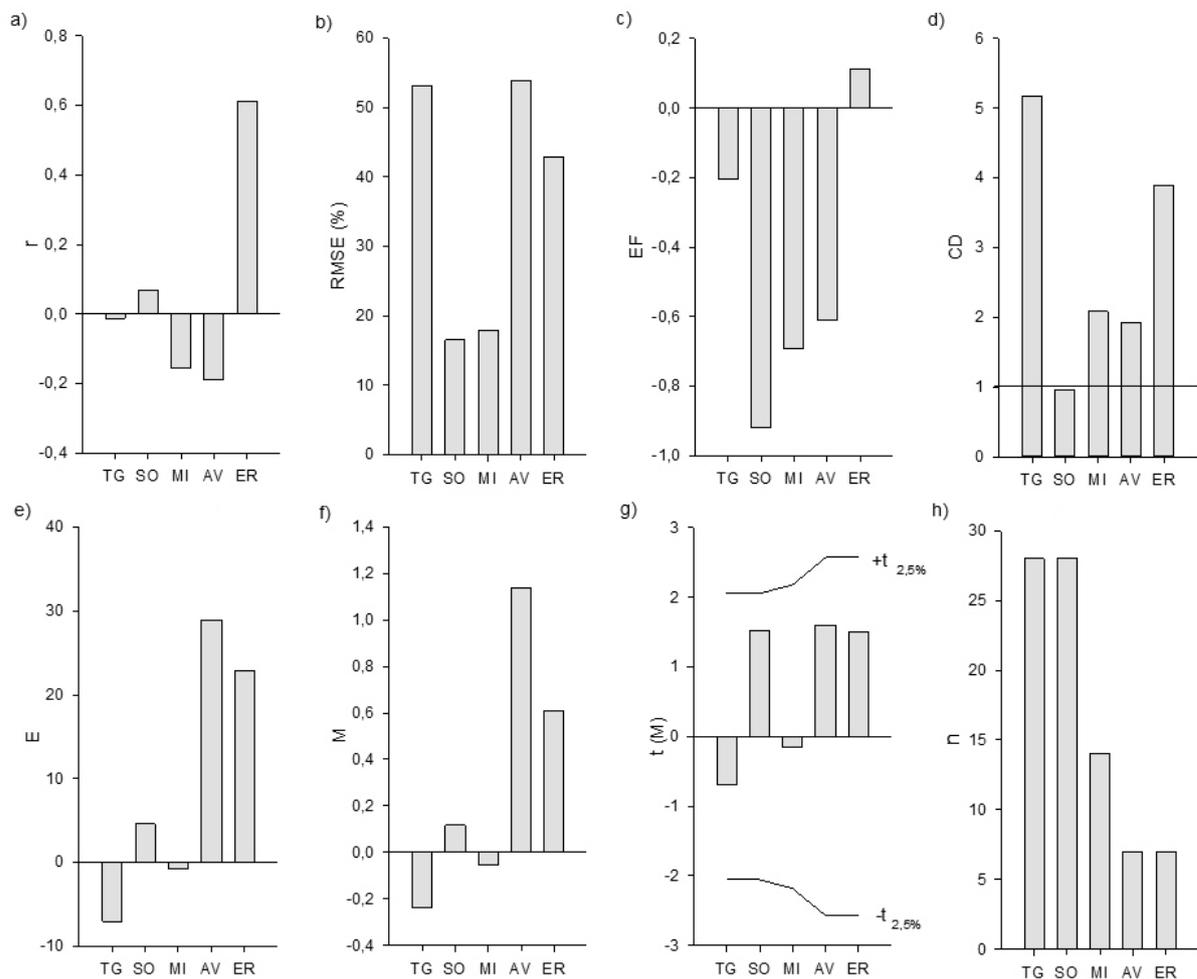


Figura 3. Análises dos testes estatísticos de adição de carbono (C) por cultura, entre resultados simulados e observados, de acordo com: a) coeficiente de correlação (r); b) raiz quadrada do erro médio (RMSE); c) eficiência do modelo (EF); d) coeficiente de determinância (CD); e) erro relativo (E); f) diferença de médias (M); g) teste t da diferença de médias (t(m)) e h)

número de amostras (n). Sendo: TG = trigo; SO = soja; MI = milho; AV = aveia preta e ER = ervilhaca.

O ajuste do “PRDX” do modelo, para cada uma das culturas do cenário III, permitiu uma boa simulação das culturas de soja, milho, trigo, aveia preta e ervilhaca em comparação com os dados observados. A cultura do trigo apresentou um dos maiores RMSE, fato também verificado por Hartman *et al.* (2011), o que pode ser explicado pela limitação do modelo em simular a produtividade desta cultura em determinados anos, por não conseguir simular doenças e granizo que contribuem para o aumento da amplitude entre dados simulados e observados.

Del Grosso *et al.* (2005) simularam as produtividades de soja, alfafa, milho, trigo e cevada, nos Estados Unidos (EUA) e obtiveram um RMSE de 13%, ao comparar com os dados observados, demonstrando que modelo simulou com fidelidade essas culturas. Ao analisar as culturas por estados o RMSE da produção vegetal aumentou para 39% mas a performance do modelo foi considerada satisfatória. Stehfest *et al.* (2007) avaliaram a produção das culturas de trigo, milho, arroz e soja de forma global, utilizando valores observados pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) e obtiveram valores de R^2 variando conforme a cultura: de 0,32 (soja) a 0,66 (trigo). Davis *et al.* (2010) obtiveram com acurácia a previsão da simulação da fitomassa da parte aérea das culturas de milho, soja e de uma pastagem da região Centro-Oeste/EUA.

Del Grosso *et al.* (2005) comentam que efeitos de topografia, vento, umidade do ar são elementos e fatores que o modelo não prevê e que podem ocasionar erros por não estar contemplado pelo Daycent em seus modelos de solo, água e temperatura.

A variação do “PRDX” foi sensível para prever a produção das culturas conforme também comentado por Chamberlain *et al.*(2011) que obteve uma correlação (r) de 0,90 para o algodão e de 0,49 para uma pastagem.

Uma vez efetuada a análise da avaliação de eficiência do modelo em prever as adições de C para todas as culturas, foram analisadas as eficiências de cada um dos sistemas para o mesmo quesito. As adições médias de C pelos sistemas foram próximas entre si com maiores diferenças no PD ERMITGSO (Figura 4).

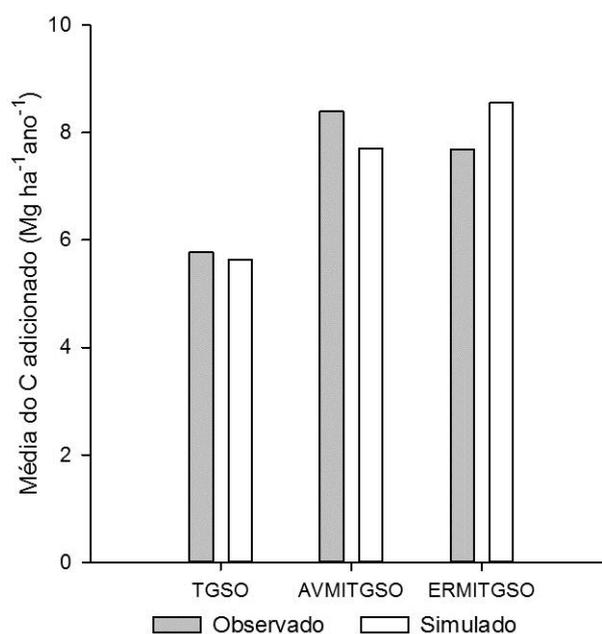


Figura 4. Resultados simulados e observados da adição de carbono (C), por sistemas de culturas sob plantio direto. Sendo: TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca.

Com relação à análise de adição de C por sistemas verificaram-se melhores resultados de adições de C pelo modelo, quando comparado com os resultados obtidos por cultura, com maiores coeficientes de correlação e menores RMSE (Figura 5a e 5b). Os erros produzidos pelo modelo em simular os sistemas variaram de 17% a 25% do RMSE (Figura

5b). O coeficiente de determinância (CD) foi acima da unidade para os sistemas PD TGSO e PD AVMITGSO (Figura 5d). Apesar de o sistema PD ERMITGSO possuir uma eficiência negativa (Figura 5c) e um CD abaixo da unidade, não foi verificado pelo teste t da diferença de médias diferenças significativas a 5% de probabilidade entre os valores simulados e observados (Figura 5g).

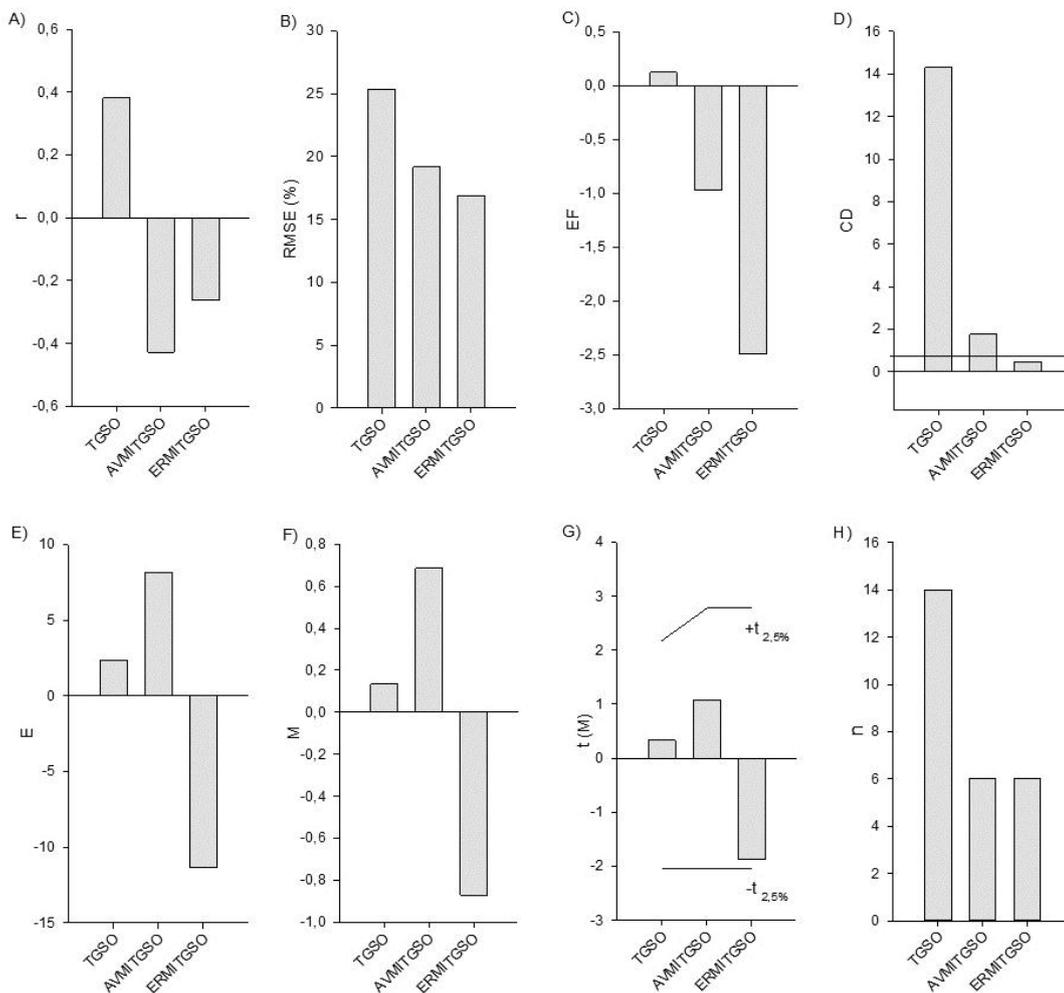


Figura 5. Análises dos testes estatísticos de adição de carbono (C), por sistemas de culturas sob plantio direto, entre resultados simulados e observados, de acordo com: a) coeficiente de correlação (r); b) raiz quadrada do erro médio (RMSE); c) eficiência do modelo (EF); d) coeficiente de determinância (CD); e) erro relativo (E); f) diferença de médias (M); g) teste t

da diferença de médias ($t(m)$) e h) número de amostras (n). Sendo: TG = trigo; SO = soja; MI = milho; AV = aveia preta e ER = ervilhaca.

As adições de C foram simuladas de forma satisfatória, com boa performance, com RMSE variando de 16 a 54% e de 17 a 26% ao analisar a cultura e o sistema, respectivamente, e estando dentro do intervalo de confiança da diferença de médias. Isso enseja uma conclusão preliminar acerca de uma boa ajustabilidade do modelo Daycent na simulação das adições de C pelos sistemas avaliados em PD.

3.2 Estoques de carbono e nitrogênio no solo

A partir da eficiência da simulação da adição de C pelos sistemas, avaliaram-se os estoques de carbono de todos os sistemas PD desde a introdução do campo nativo (CN). A linha base do CN mostra um estoque de carbono superior aos demais sistemas (Figura 6). A partir da introdução de um sistema agrícola em manejo convencional (PC), observou-se grande decréscimo neste estoque (-49%). A introdução da agricultura sob Plantio Direto (PD) fez aumentar o C no solo ($\approx 44\%$), o que era de se esperar.

Apesar de o modelo ter a sensibilidade de alterar os estoques de carbono conforme as mudanças de uso verificou-se que para ambos os sistemas de PD ocorreu uma subestimativa do COT em relação aos estoques observados. A subestimativa da COT pelo modelo para os sistemas de PD variou de 27 a 30% em relação aos dados observados. Li *et al.* (2006) ao simularem o COT na Califórnia, de uma vegetação composta por arbustos (chaparral), obtiveram uma subestimativa de 12% em relação ao observado. Entretanto os autores alteraram as relações C/N da matéria orgânica, do carbono no solo, e também da vegetação de forma a obter uma melhor estimativa.

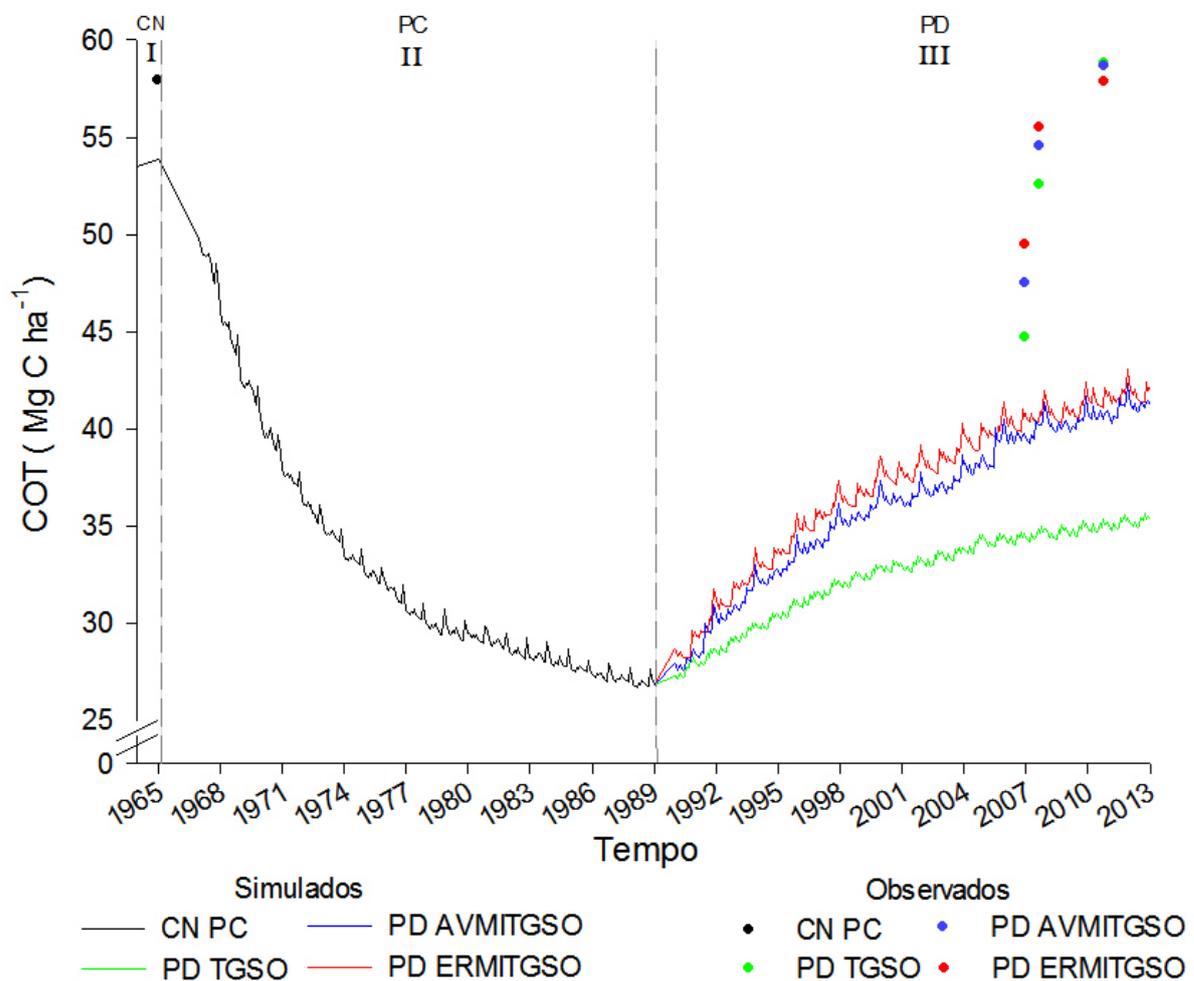


Figura 6. Simulação do histórico do estoque de carbono orgânico total (COT) na profundidade de 0-20 cm, desde campo nativo até os sistemas de culturas sob plantio direto. Sendo: CN = campo nativo; PC = preparo convencional; PD = plantio direto; TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca.

Foram simulados os estoques de carbono, para cada sistema, e também para o CN na camada de 0-20 cm (Figura 7). Os estoques simulados pelo modelo foram menores em relação aos estoques observados, para todos os sistemas de culturas, inclusive para o CN. Esperar-se-ia que os estoques simulados nos sistemas em PD estivessem o mais próximo possível dos estoques observados, uma vez que as simulações das adições de C pelas culturas foram feitas

de maneira satisfatória. Pode ser que as adições de C do cenário II pelas culturas de TG e SO tenham sido subestimadas, uma vez que não foram avaliadas estatisticamente pela falta de dados observados, pois os dados se resumiam apenas a uma média de adição de carbono, sendo estes obtidos a partir da produtividade de grãos utilizando índices de colheita, relações entre parte aérea/raízes e a concentração de carbono para estimar a adição de carbono. A produtividade do local do experimento, situado em Ponta Grossa, pode ser diferente da média utilizada, que representa a produção do Paraná, contribuindo para uma menor adição de carbono pelas culturas que influenciaram tanto os estoques de carbono do solo do cenário II bem quanto do cenário III, possibilitando menores diferenças entre simulado e observado conforme o período avaliado. Ressalta-se que não haviam informações de estoque de carbono na transição do cenário II para o III, que poderia de certa forma contribuir para uma melhor simulação do comportamento do COT.

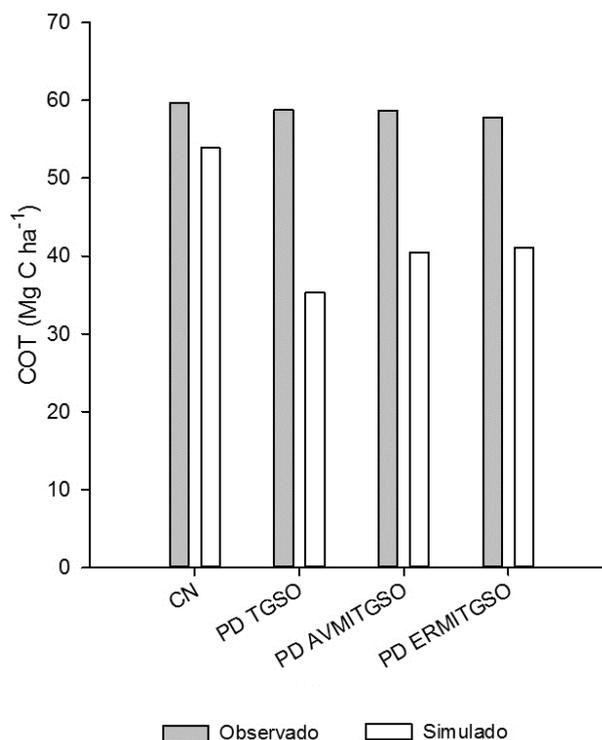


Figura 7. Estoques simulados e observados de carbono orgânico total (COT) na profundidade de 0-20 cm de um solo submetido a diferentes sistemas de culturas, no ano de 2010. Sendo:

CN = campo nativo; PD = plantio direto; TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca.

A análise das diferenças entre os resultados simulados e observados do COT, para cada um dos sistemas, mostrou correlações que variaram entre 0,46 e 0,48 (Figura 8a). O erro produzido pelo modelo oscilou entre 22 e 29% (Figura 8b), sendo que a performance do modelo em relação a EF e CD não se mostrou satisfatória, uma vez que para EF os valores foram negativos e para CD os valores foram abaixo da unidade (Figuras 8c e 8d) (Smith *et al.*, 1997). O maior erro relativo ocorreu para o sistema PD TGSO, sendo também verificado o mesmo comportamento na análise de diferença de médias (Figuras 8e e 8f). Entretanto, não foram diagnosticadas diferenças estatísticas a 5% de probabilidade em cada um dos sistemas (Figura 8g). Desta forma, pode-se inferir que a simulação do COT pelo modelo Daycent foi adequada.

O NT do solo demonstrou comportamento similar ao COT nos cenários I a III de cada sistema (Figura 9). A simulação do estoque de NT para o CN mostrou valores superiores aos demais sistemas agrícolas, com um decréscimo de 29% a partir da conversão do CN para agricultura em manejo convencional (PC). A inflexão na curva de nitrogênio do solo, a indicar um acúmulo de aproximadamente 17% ocorreu a partir da introdução do sistema PD.

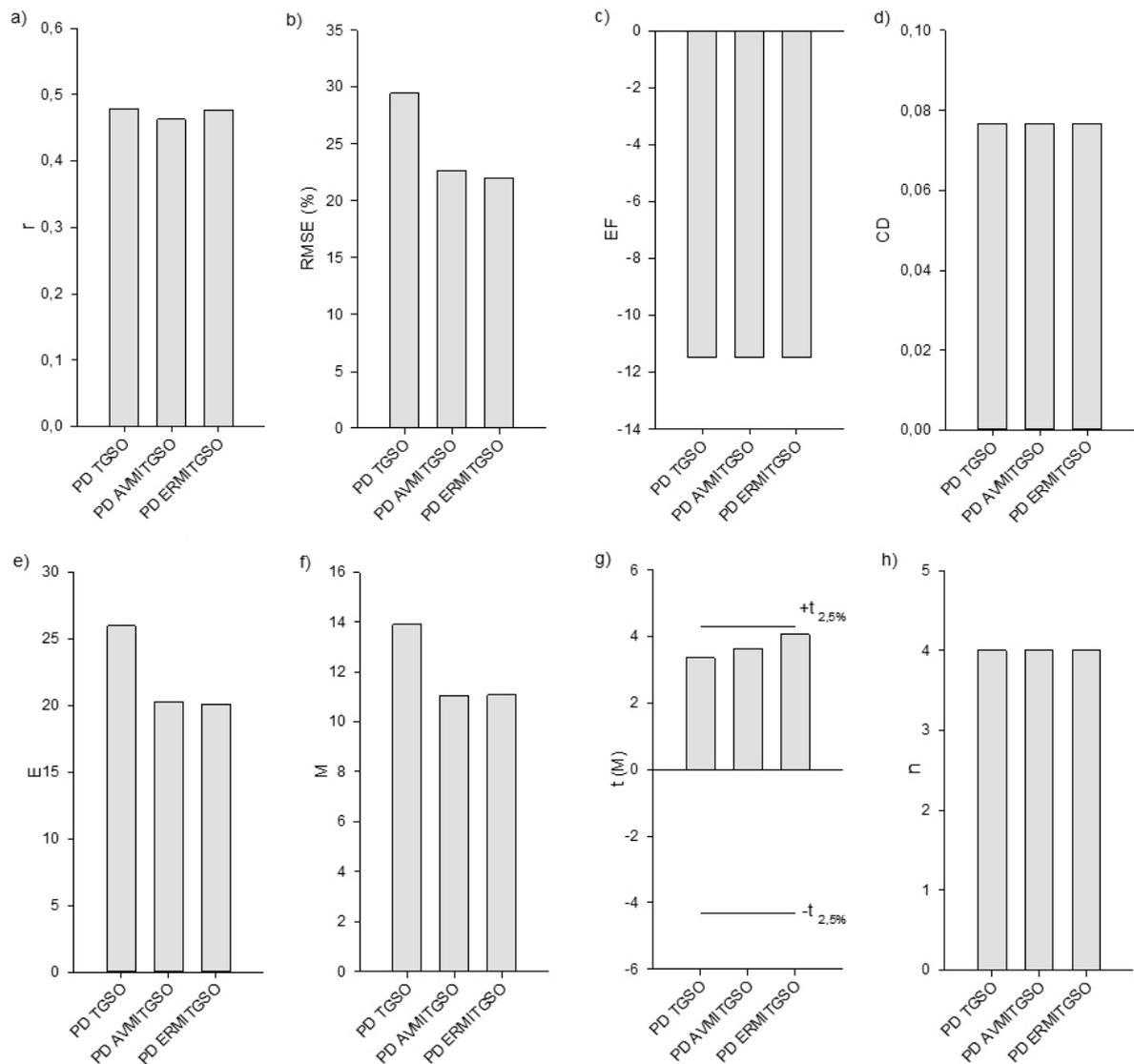


Figura 8. Testes estatísticos do carbono orgânico total (COT), na profundidade de 0-20cm, por sistema de culturas sob plantio direto, entre resultados simulados e observados, de acordo com: a) coeficiente de correlação (r); b) raiz quadrada do erro médio (RMSE); c) eficiência do modelo (EF); d) coeficiente de determinância (CD); e) erro relativo (E); f) diferença de médias (M); g) teste t da diferença de médias (t(m)) e h) número de amostras (n). Sendo: PD = plantio direto; TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca.

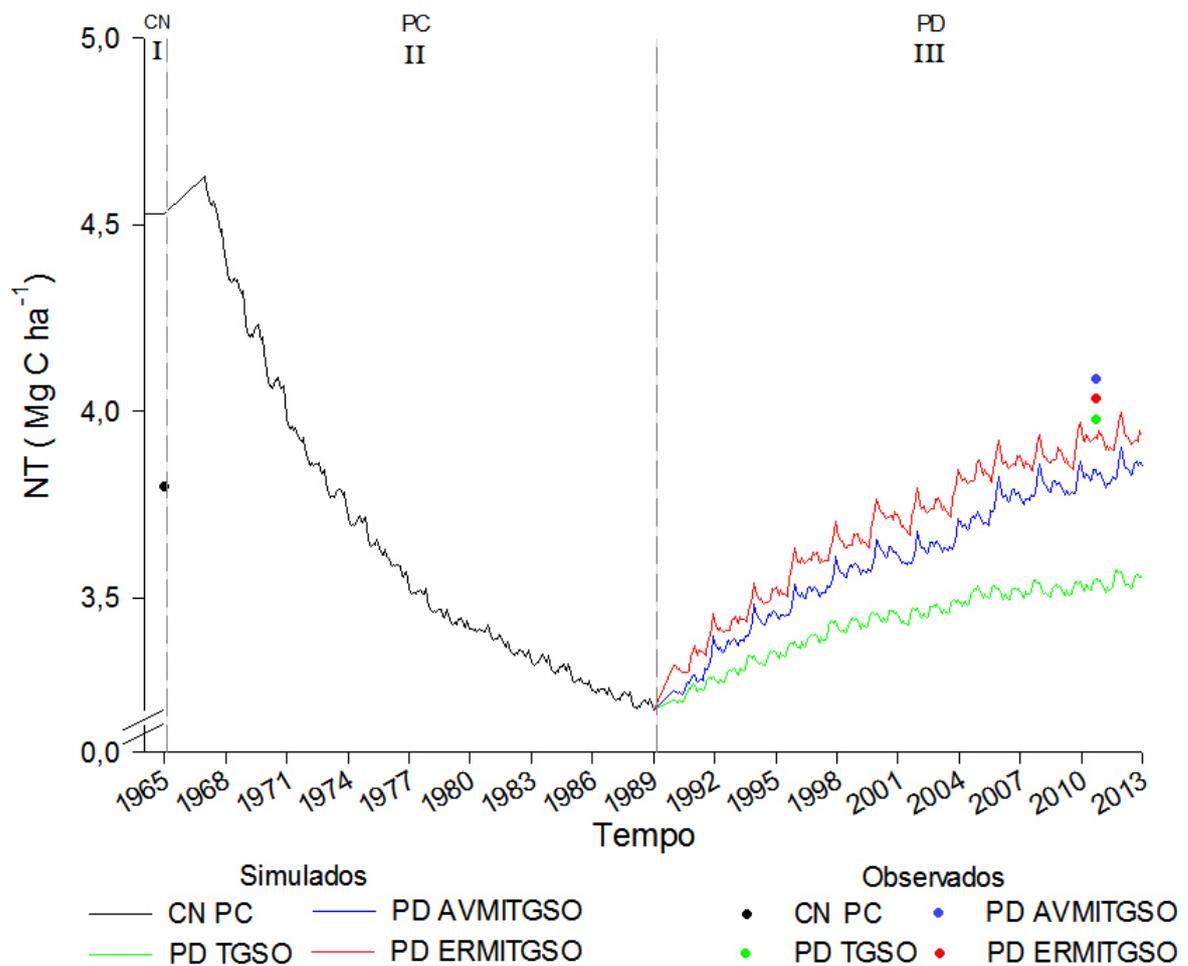


Figura 9. Simulação do histórico do estoque de nitrogênio total (NT) na profundidade de 0-20 cm, desde campo nativo até os sistemas de culturas sob plantio direto. Sendo: CN = campo nativo; PC = preparo convencional; PD = plantio direto; TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca.

Referente aos estoques de nitrogênio simulados e observados para cada sistema, o modelo Daycent subestimou os estoques de NT nos sistemas de culturas em PD (Figura 10), comportamento similar ao COT. Entretanto, as diferenças entre os resultados simulados e observados foram menores na simulação do NT em relação ao COT, cuja amplitude de variação ocorreu entre 2 e 19%, com a maior variação na estimativa do CN. Li *et al.* (2006) obtiveram uma diferença de 22% entre resultados simulados e observados do NT em um estudo na Califórnia, EUA.

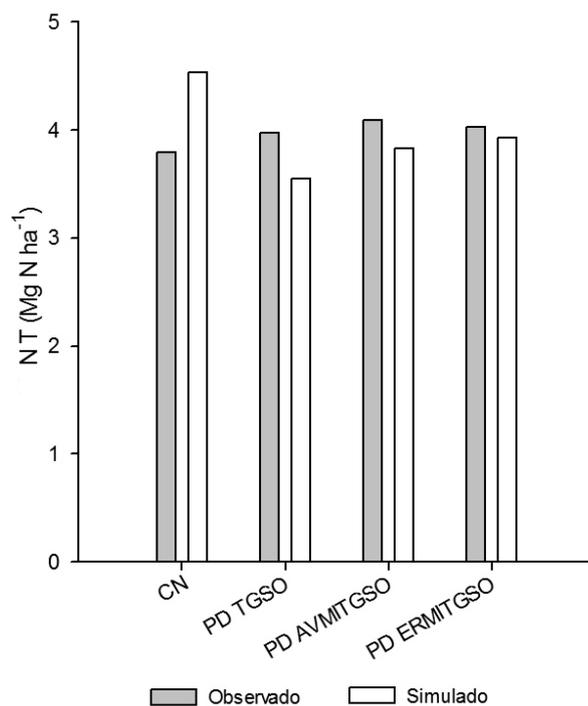


Figura 10. Estoques simulados e observados de nitrogênio total (NT) na profundidade de 0-20 cm de um solo submetido a diferentes sistemas de culturas, no ano de 2010. Sendo: CN = campo nativo; PD = plantio direto; TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca.

De modo a comparar os resultados simulados e observados dos estoques de nitrogênio, foram analisados todos os sistemas de maneira conjunta, incluindo o CN (Tabela 4). O grau de correlação da eficiência do modelo Daycent em simular os estoques de N, pelo comportamento entre os resultados simulados e observados, foi negativa, causada pela superestimativa da simulação do NT para o CN. O erro produzido pelo modelo foi de 11% da RMSE (Tabela 4). A eficiência (EF) do modelo foi negativa e o coeficiente de determinância se mostrou abaixo de 1, o que sinaliza que o modelo efetuou uma simulação com uma alta variância em relação à média dos dados observados, o que não é desejável. Foram avaliadas, também, as diferenças de médias pelo teste t, sendo que o valor obtido foi inferior ao intervalo

de confiança a 5% de probabilidade. Assim, os estoques de nitrogênio foram simulados de forma adequada, não apresentando diferenças estatísticas com os dados observados (Tabela 4). O modelo apresentou melhor performance na simulação dos estoques de NT, em comparação às simulações do COT, uma vez que apresentou menor erro dado pelo RMSE.

Tabela 4. Análise dos resultados entre simulados e observados do estoque de nitrogênio total na profundidade de 0-20 cm, de todos os sistemas sob plantio direto e incluindo campo nativo.

r	RMSE %	EF	CD	E	M	t (M)	t _{5%}	n
-0,76	11,23%	-15,93	0,09	0,36	0,01	0,06	4,30	4

Sendo: r = coeficiente de correlação; RMSE = raiz quadrada do erro médio; EF = eficiência do modelo; CD = coeficiente de determinância; E = erro relativo; M = diferença de médias; t (M) = teste t da diferença de médias e n = número de amostras.

3.3 Emissão de N₂O

Fluxos de N₂O foram simulados desde 2010 até o final de 2011 (Figura 11). No sistema PD TGSO (Figura 11a), observa-se que o modelo não simulou emissões negativas. O modelo permitiu simular os fluxos de N₂O para este sistema quando foram próximos à zero, o que ocorreram, respectivamente, entre os períodos de colheita da SO e plantio de TG e próximo ao início de setembro de 2011; além de picos de emissão ocasionados pela adubação nitrogenada do trigo e pela precipitação pluvial.

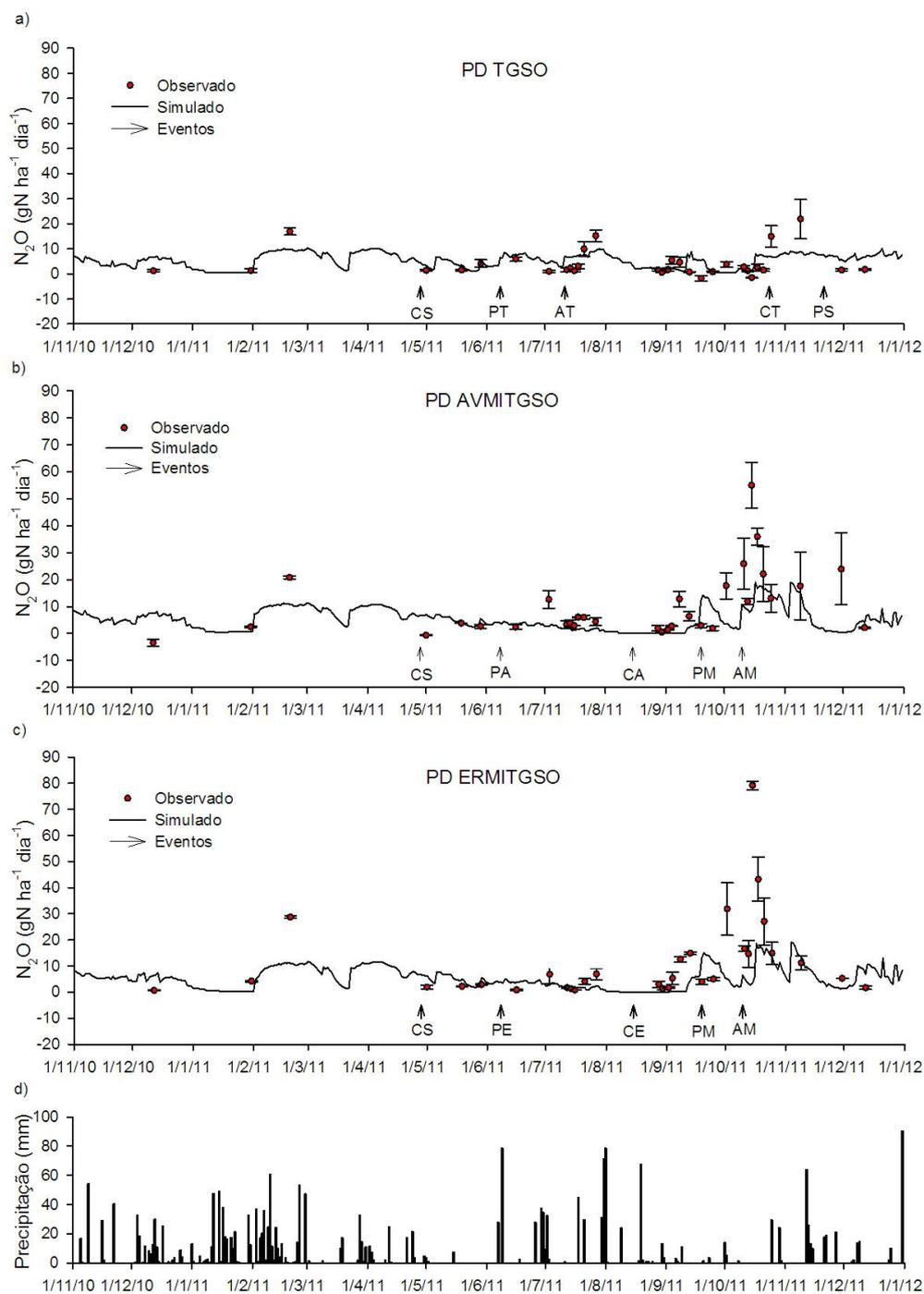


Figura 11. Fluxos de N₂O simulados (linha) e observados (círculos, com seus erros-padrão, n = 32) em 2010 e 2011, nos sistemas: a) PD TGSO; b) PD AVMITGSO; c) PD ERMITGSO. Setas indicam os eventos de colheita da SO (CS), plantio do TG (PT), adubação do TG (AT), colheita do TG (CT), plantio da SO (PS), plantio da AV (PA), colheita da AV (CA), plantio do MI (PM), adubação do MI (AM), plantio de ER (PE) e colheita de ER (CE). Em d) barras

em preto indicam a precipitação diária. Sendo: PD = plantio direto; TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca.

No sistema PD AVMITGSO (Figura 11b) o modelo conseguiu estimar as emissões quando estas foram próximas à zero (maio a setembro de 2011), além das emissões ocasionadas pela adubação nitrogenada na cultura do MI e pela precipitação.

No sistema PD ERMITGSO (Figura 11c) o modelo conseguiu simular os fluxos observados quando estes foram próximos à zero, entre maio e setembro de 2011. Entretanto, a simulação não se mostrou tão eficiente quando em comparação com os demais sistemas, em especial os picos de emissões ocasionados pela adubação nitrogenada na cultura do MI. O modelo foi sensível aos eventos de precipitação que refletiram na emissão de N_2O , conforme verificado também nos demais sistemas de PD.

A análise entre fluxos simulados e observados de N_2O para cada um dos sistemas demonstrou que as maiores correlações ocorreram nos sistemas PD TGSO e AVMITGSO, com previsões de picos ocasionados pelas adubações nitrogenadas neste último sistema (Figura 12a). No PD ERMITGSO ocorreu o menor erro (RMSE) entre fluxos simulados e observados, em relação aos demais sistemas (Figura 12b). Entretanto, todos os sistemas ficaram abaixo do intervalo do RMSE a 95% de probabilidade. Já na avaliação da eficiência do modelo (EF), para todos os sistemas foram obtidos valores positivos, demonstrando que a tendência dos dados esteve melhor representada que a própria média das observações (Figura 9c) (Smith *et al.*, 1997). O modelo Daycent apresentou, também, para todos os sistemas os coeficientes de determinância superiores à unidade, ou seja, o modelo descreve os dados observados com uma menor variância em relação à média das observações (Figura 12d). Já o erro relativo (E), para todos os sistemas, ficou abaixo do intervalo de confiança (95%) (Figura 9e). Na análise de LOFIT (adequabilidade de ajuste) destacaram-se os sistemas PD

AVMITGSO e PD ERMITGSO com os maiores valores de falta de ajuste. Entretanto, não apresentaram diferenças estatísticas a 5% de probabilidade (Figuras 12h e 12i), devido a variabilidade existente nos dados observados, a qual somente foram observadas diferenças estatísticas pelo teste t da diferença de médias (Figura 12g). O modelo conseguiu estimar, com mais eficiência, o sistema PD TGSO, o qual apresentou os menores fluxos diários em comparação com os demais sistemas PD (correlação de 0,54), sem que se tenha observado diferenças estatísticas nas médias para este sistema.

O modelo foi sensível ao efeito das adubações nitrogenadas aplicadas nas culturas nos sistemas sob PD. Abdalla *et al.* (2010), ao simularem os fluxos de N₂O em uma pastagem da Irlanda, também verificaram os efeitos dessas adubações nas emissões. Os autores ainda comentam que o modelo pode demonstrar um segundo pico de emissão quando ocorrer uma precipitação com temperaturas elevadas. Este fato foi verificado em todos os sistemas de PD, quando se verificou, logo após a adubação nitrogenada e um primeiro pico de emissão de N₂O, outro segundo pico tendo ocorrido após um evento de precipitação, demonstrando a sensibilidade do modelo em simular os fluxos de N₂O.

Del Grosso *et al.* (2001) simularam os fluxos de N₂O em uma pastagem, plantio de milho e cevada. Para a pastagem, os autores obtiveram uma alta variabilidade diária entre os dados simulados e observados. Entretanto, o modelo simulou as tendências ao analisar os fluxos mensais e seu comportamento sazonal. Destaca-se que para o inverno o modelo teve uma tendência de subestimar os fluxos observados. Para o milho, o modelo representou bem a variabilidade diária, além de os padrões sazonais de emissão em relação aos dados observados, sendo considerada uma simulação razoável. Para a cevada houve uma superestimativa de N₂O no inverno, devido ao processo de desnitrificação uma vez que a condição de umidade do solo estava próxima à capacidade de campo.

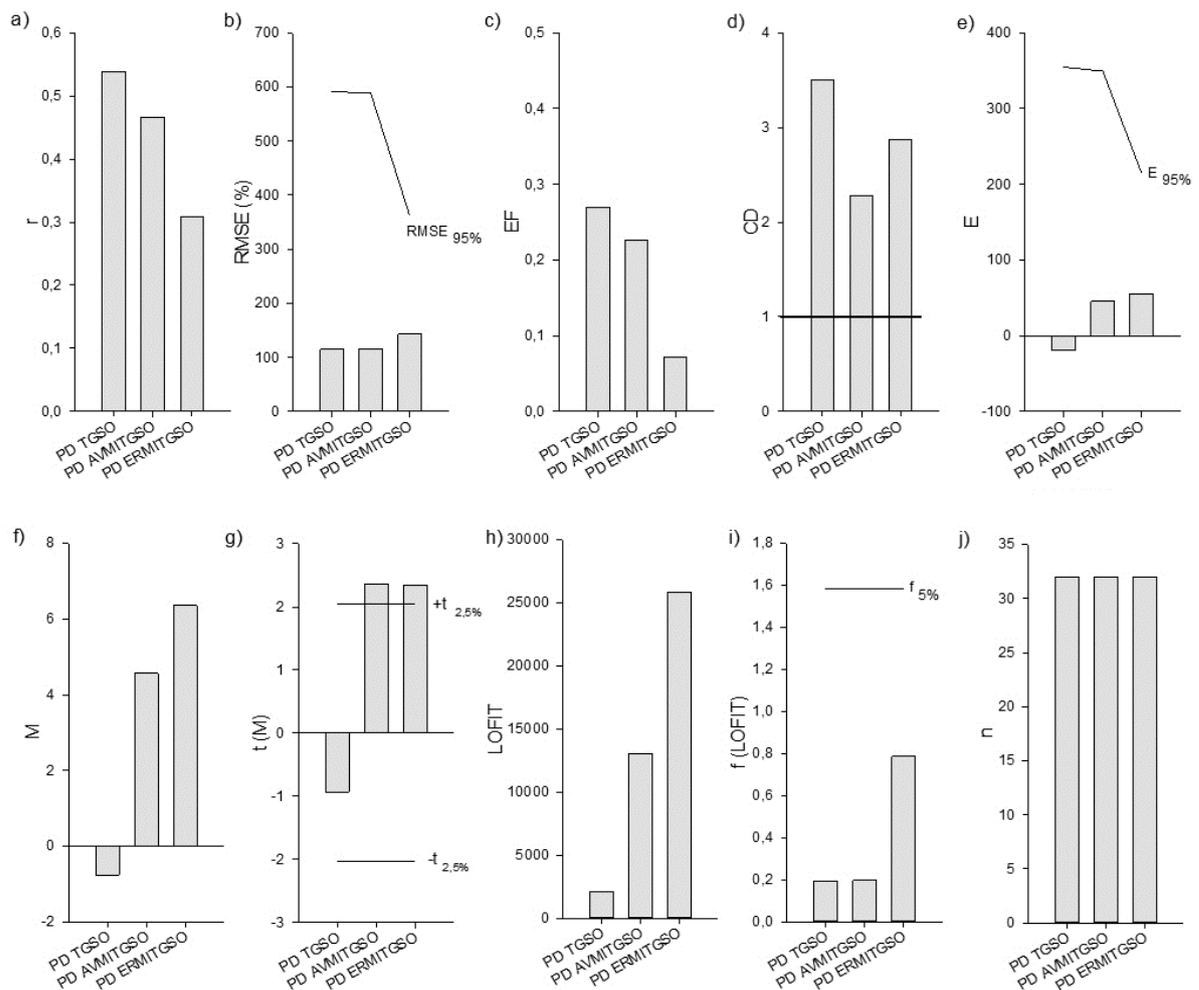


Figura 12. Fluxos de N₂O por sistemas de culturas, entre resultados simulados e observados, de acordo com: a) coeficiente de correlação (r); b) raiz quadrada do erro médio (RSME); c) eficiência do modelo (EF); d) coeficiente de determinância (CD); e) erro relativo (E); f) diferença de médias (M); g) teste t da diferença de médias (t(m)); h) falta de ajuste (LOFIT); i) teste f da falta de ajuste (f(LOFIT)) e j) número de amostras (n). Sendo: PD = plantio direto; TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca.

Jarecki *et al.* (2008) avaliaram o sistema de plantio direto de milho/soja em Iowa, nos EUA, e verificaram, também, que o modelo respondia aos eventos de precipitação. Entretanto, algumas discrepâncias ocorriam como superestimativa e subestimativas, em determinados períodos dos dados observados. Contudo, o modelo simulava o padrão das

emissões observadas, mas não na mesma magnitude. A correlação dos dados simulados com os observados foi de 0,37, com a tendência do modelo de superestimar quando os fluxos eram baixos e subestimar os fluxos quando estes eram altos. Os autores também ressaltam que o modelo pode ter um retardamento do efeito da precipitação, ocasionando num descompasso entre dado simulado e observado. Isso denota uma dificuldade do modelo em simular a entrada de água no solo.

Del Grosso *et al.* (2001) comentam que a explicação para as diferenças entre alguns picos de emissão é devido à defasagem de medida entre a precipitação ocorrida no local do experimento e aquela lida na estação meteorológica. Parton *et al.* (1998) comentam que um modelo de ecossistemas como o Daycent necessita simular as condições de crescimento da planta, absorção e mineralização de nutrientes e a dinâmica da água e temperatura no solo, para então simular os fluxos de N₂O. Desta forma, qualquer erro produzido durante este processo pode conduzir a imprecisões nas simulações das emissões de N₂O.

A subestimativa do COT no solo poderia estar influenciando os fluxos de N₂O, pois o aumento de conteúdo de C poderia aumentar a desnitrificação (Dalal *et al.*, 2003), diminuindo, conseqüentemente, as diferenças entre os dados simulados nos eventos de precipitação.

Conforme comentado por Zhang (2012), o modelo Daycent necessita melhorias para simular os fluxos de N₂O de forma diária. O autor avaliou uma gramínea (*Poa pratensis*) em três locais do Estado de Colorado - EUA, tendo encontrado tendências aceitáveis dos fluxos diários, com r variando de 0,53 a 0,60.

Ao analisar os fluxos acumulados de N₂O, para o período de um ano, verificou-se que o modelo subestimou as emissões para ambos os sistemas PD (Figura 13). A menor

diferença obtida foi no sistema PD TGSO (8%) e nos demais sistemas ocorreram subestimativas que variaram de 36 a 43%.

De modo a comparar os resultados simulados e observados dos fluxos acumulados de N₂O foram analisados todos os sistemas PD de maneira conjunta (Tabela 5). O erro produzido pelo modelo foi de 37% (RMSE). As diferenças de médias entre simulado e observado dos fluxos acumulados foram estatisticamente diferentes pelo teste t, fato verificado também quando foi analisado os fluxos diários.

Apesar de o processo de calibração ter sido realizado com apenas um único parâmetro ("PRDX"), verificou-se que o modelo necessita de melhores estimativas das adições de carbono pelas culturas do cenário II, visto a subestimativa do COT no cenário III. Além de ajustes nos atributos que controlam os fluxos de N₂O, uma vez que o comportamento da emissão de N₂O entre os sistemas PD AVMITGSO e PD ERMITGSO foram muito parecidos entre si, não ocorreram diferenças entre o uso de uma gramínea (AV) e uma leguminosa (ER).

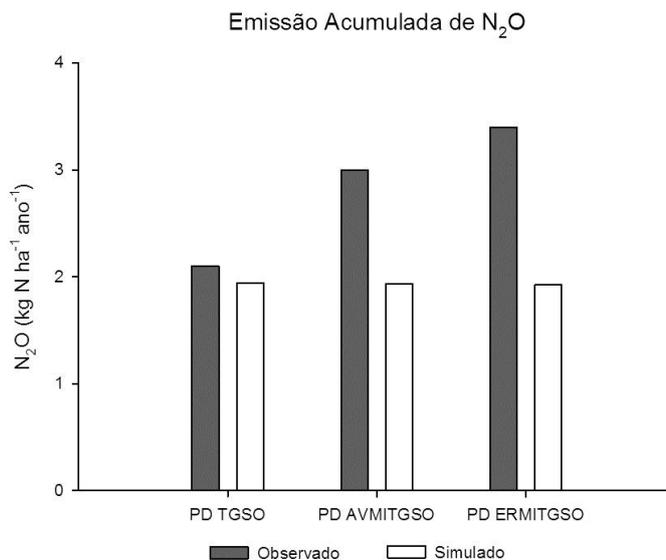


Figura 13. Resultados simulados e observados da emissão acumulada de N₂O, no intervalo de um ano (2010 a 2011), por sistemas de culturas sob plantio direto. Sendo: PD = plantio direto; TG = trigo; SO = soja; AV = aveia preta; MI = milho e ER = ervilhaca.

Tabela 5. Análises dos resultados simulados e observados da emissão anual acumulada de N₂O, para os sistemas de culturas sob plantio direto.

r	RMSE %	EF	CD	E	M	t (M)	t 5%	n
-0,99	37,28%	-2,77	0,36	31,82	0,90	28,21	12,71	3

Sendo: r = coeficiente de correlação; RMSE = raiz quadrada do erro médio; EF = eficiência do modelo; CD = coeficiente de determinância; E = erro relativo; M = diferença de médias; t (M) = teste t da diferença de médias e n = número de amostras.

4 CONCLUSÕES

1) O modelo Daycent simulou adequadamente as adições de carbono dos sistemas PD TGSO, PD AVMITGSO e PD ERMITGSO.

2) Os estoques de carbono e nitrogênio no solo dos sistemas de culturas sob plantio direto no cenário III apesar de não apresentarem diferenças estatísticas pelo teste t da diferença de médias entre resultados simulados e observados, há necessidade de melhorias nas adições de carbono pelas culturas do cenário II (trigo e soja) para uma melhor simulação dos estoques.

3) O modelo Daycent não foi adequadamente calibrado e validado para estimativas de fluxos de N_2O nos sistemas de cultivo sob PD pelo não atendimento aos requisitos relacionados ao teste t de diferença de médias. Entretanto foi sensível aos efeitos da precipitação e adubação nitrogenada nos sistemas avaliados.

5 LITERATURA CITADA

- ABDALLA, M.; JONES, M.; YELURIPATI, J.; SMITH, P.; BURKE, J. & WILLIAMS, M. Testing Daycent and DNDC model simulations of N₂O fluxes and assessing the impacts of climate change on the gas flux and biomass production from a humid pasture. *Atmospheric Environment*, 44:2961-2970, 2010.
- ADDISCOTT, T.M. Simulation modelling and soil behaviour. *Geoderma*, 60:15-40, 1993.
- AJWA, H.A. & TABATABAI, M.A. Decomposition of different organic materials in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 18:175-182, 1994.
- ALBURQUERQUE, M.A. Estoques de carbono e nitrogênio e emissões de gases de efeito estufa em Latossolo Vermelho sob sistemas de culturas em Plantio Direto. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2012. 105p. (Dissertação de Mestrado)
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. & CERETTA, C.A. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from Southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. *Soil & Tillage Research*, 53: 95–104, 2000.
- BOLINDER, M.A.; JANZEN, H.H.; GREGORICH, E.G.; ANGERS, D.A. & VANDENBYGAART, A.J. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 118: 29–42, 2007.
- BURLE, M.L.; MIELNICZUK, J. & FOCCHI, S. Effect of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. *Plant Soil*, 190:309–316, 1997.
- CAVIGLIONE, J.H.; KIIHL, L.R.B.; CARAMORI, P.H. & OLIVEIRA, D. Cartas climáticas do Paraná. Londrina, IAPAR, 2000. CD

- CHAMBERLAIN, J.F.; MILLER, S.A. & FREDERICK, J.R. Using DAYCENT to quantify on-farm GHG emissions and N dynamics of land use conversion to N-managed switchgrass in the Southern U.S. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, in press, 2011.
- COUTINHO, R.P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; ALVES, B.J.R.; TORRES, A.Q.A. & JANTALIA, C.P. Estoque de carbono e nitrogênio e emissão de N₂O em diferentes usos do solo na Mata Atlântica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45:195-203, 2010.
- DALAL, R. C.; WANG, W.; ROBERTSON, G. P. & PARTON, W. J. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. *Australian Journal of Soil Research*, 41:165-195, 2003.
- Da-SILVA, V.L.; PERGHER, M.; FAVARETTO, N.; MOLIN, R. & DIECKOW J. Estoque de carbono em sistemas de cultura para grãos e forragem sob plantio direto. *Synergismus Scyentifica UTFPR*, 4:1-3, 2009.
- DAVIS, S.C.; PARTON, W.J.; DOHLEMAN, F.G.; SMITH, C.M.; DEL GROSSO, S.J.; KENT, A.D. & DeLUCIA, E.H. Comparative Biogeochemical Cycles of Bioenergy Crops Reveal Nitrogen-Fixation and Low Greenhouse Gas Emissions in a *Miscanthus x giganteus* Agro-Ecosystem. *Ecosystems*, 13:144-156, 2010.
- DEL GROSSO, S.J.; PARTON, W.J.; MOSIER, A.R.; HARTMAN, M.D.; BRENNER, J.; OJIMA, D.S. & SCHIMEL, D.S. Simulated interaction of carbon dynamics and nitrogen trace gas fluxes using the DAYCENT model. In: Shaffer, M.J.; Ma, L. & Hansen, S., ed. *Modeling carbon and nitrogen dynamics for soil management*. Florida, CRC Press, 2001. p.303–332.
- DEL GROSSO, S.J.; OJIMA, D.; PARTON, W.; MOSIER, A.; PETERSON, G. & SCHIMEL, D. Simulated effects of dryland cropping intensification on soil organic

matter and greenhouse gas exchanges using the Daycent ecosystem model. *Environmental Pollution*, 116:75–83, 2002.

DEL GROSSO, S.J.; MOSIER, A.R.; PARTON, W.J. & OJIMA, D.S. Daycent model analysis of past and contemporary soil N₂O and net greenhouse gas flux for major crops in the USA. *Soil & Tillage Research*, 83:9-24, 2005.

DEL GROSSO, S.J., PARTON, W.J., KEOUGH, C. & REYES-FOX, M.A. 2011. Special features of the daycent modeling package and additional procedures for parameterization, calibration, validation, and applications. In: Ahuja, L.R. & Ma, I. *Methods of Introducing System Models into Agricultural Research*. Wisconsin, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2011. p.177-208.

FANG, C. & MONCRIEFF, J.B. A model for soil CO₂ production and transport 1:: Model development. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95:225–236, 1999.

HARTMAN, M.D.; MERCHANT, E.R.; PARTON, W.J.; GUTMANN, M.P.; LUTZ, S.M. & WILLIAMS, S.A. Impact of historical land-use changes on greenhouse gas exchange in the U.S. Great Plains, 1883–2003. *Ecological Applications* 21:1105–1119, 2011.

JARECKI, M.K.; PARKIN, T.B.; CHAN, A.S; HATFIELD, J.L. & JONES, R. Comparison of DAYCENT-Simulated and Measured Nitrous Oxide Emissions from a Corn Field. *Journal of Environmental Quality*, 37:1685-1690, 2008.

JOHNSON, J.M.F.; REICOSKY, D.C.; ALLMARAS, R.R.; SAUER, T.J.; VENTEREA, R.T. & DELL, C.J. Greenhouse gas contributions and mitigation potential of agriculture in the central USA. *Soil & Tillage Research*, 83:73–94, 2005.

- KELLY, R.H.; PARTON, W.J.; HARTMAN, M.D.; STRETCH, L.K.; OJIMA, D.S. & SCHIMEL, D.S. Intra-annual and interannual variability of ecosystem processes in shortgrass steppe. *Journal of Geophysical Research*, 105: 20093–20100, 2000.
- KHALIL, K., MARY, B. & RENAULT, P. Nitrous oxide production by nitrification and denitrification in soil aggregates as affected by O₂ concentration. *Soil Biology & Biochemistry*, 39:687–699, 2004.
- LANG, M.; CAI, Z. & CHANG, S.X. Effects of land use type and incubation temperature on greenhouse gas emissions from Chinese and Canadian soils. *Journal of Soils and Sediments*, 11:15–24, 2011.
- LI, X.; MEIXNER, T.; SICKMAN, J.O.; MILLER, A.E.; SCHIMMEL, J.P. & MELACK, J.M. Decadal-scale dynamics of water, carbon and nitrogen in a California chaparral ecosystem: DAYCENT modeling results. *Biogeochemistry*, 77:217-245, 2006.
- LIU, H.; ZHAO, P.; LU, P.; WANG, Y.-S.; LIN, Y.-B. & RAO, X.-Q. Greenhouse gas fluxes from soils of different land-use types in a hilly area of South China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 124:125-135, 2008.
- MOLIN, R. Subsistemas de produção em plantio direto: explorando alternativas econômicas rentáveis para o inverno. Castro-PR, Fundação ABC, 2008. 104p.
- PARTON, W.J.; OJIMA, D.S.; COLE, C.V. & SCHIMMEL, D.S. A general model for soil organic matter dynamics: sensitivity to litter chemistry, texture and management. In: Bryant, R. B. & Arnold, R.W., ed. *Quantitative Modeling of Soil Forming Processes*. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p.147–167. (Special Pub. 39)
- PARTON, W.J., HARTMAN, M.D., OJIMA, D.S. & SCHIMMEL, D.S. Daycent and its land surface submodel: description and testing. *Global Planetary Change*, 19:35–48, 1998.

- PAUSTIAN, K.; ANDREN, O.; JANZEN, H.H.; LAL, R.; SMITH, P.; TIAN, G.; TIESSEN, H.; VAN NOORDWIJK, M. & WOOMER, P.L. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions. *Soil Use and Management*, 13:230–244, 1997.
- RAMOS, A.M.; SANTOS, L.A.R. dos & FORTES, L.T.G. Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990. Ed. rev. e ampl. Brasília, INMET, 2009. 465p.
- RYKIEL, E.J.J. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling*, 90:229-224, 1996.
- SÁ, J.C. de M.; CERRI,C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENSKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C. & FEIGL, B.E. Carbon sequestration in a plowed and no-tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. In: Stott, D.E.; Mohtar, R.H.; and Steinhardt, G.C. Sustaining the Global Farm – Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting, May 24-29, 1999. West Lafayette, IN. International Soil Conservation Organization in cooperation with the USDA and Purdue University, 2001a. p.466-471.
- SÁ, J.C.de M.; CERRI,C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENSKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C. & FEIGL, B.E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Science Society of America Journal*, 65:1486-1499, 2001b.
- SANTOS, N.Z. dos; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MOLIN, R.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V. & PIVA, J.T. Forages, cover and related shoot and root additions in no-till rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. *Soil & Tillage Research*, 111:208-218, 2011.

- SAXTON, K. E.; RAWLS, W.J.; ROMBERGER, J.S. & PAPENDICK, R.I. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50:1031–1036, 1986.
- SECRETARIA DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO. Trigo safra 2008/09. Volume 1. Paraná, 2009. 10p.
- SECRETARIA DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO. Trigo safra 2009/10. Volume 1. Paraná, 2010. 10p.
- SIEWERDT, L.; NUNES, A.P. & SILVEIRA JÚNIOR, P. Efeito da adubação nitrogenada na produção e qualidade da matéria seca de um campo natural de Planossolo no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrociência*, 1:157-162, 1995.
- SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.J.; VENZKE FILHO, S.P.; CERRI, C. E.P. & CERRI, C.C. Rotação de culturas no sistema plantio direto em Tibagi (PR): II - Emissões de CO₂ e N₂O. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33:1023-1029, 2009.
- SISTI, C.P.J.; SANTOS, H.P. dos; KOHHANN, R.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. & BODDEY, R.M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*. 76: 39–58, 2004.
- SMITH, P.; SMITH, J.U.; POWLSON, D.S.; MCGILL, W.B.; ARAH, J.R.M.; CHERTOV, O.G.; COLEMAN, K.; FRANKO, U.; FROLKING, S.; JENKINSON, D.S.; JENSEN, L.S.; KELLY, R.H.; KLEIN-GUNNEWIEK, H.; KOMAROV, A.S.; MOLINA, J.A.E.; MUELER, T.; PARTON, W.J.; THORNLEY, J.H.M. & WHITMORE, A.P. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 81:153-225, 1997.

STEHFEST, E.; HEISTERMANN, M.; PRIESS, J.A; OJIMA, D.S. & ALCAMO, J.

Simulation of global crop production with the ecosystem model DayCent. *Ecological Modelling*, 209:203-219, 2007.

ZHANG, Y. Simulated carbon and nitrogen dynamics in turfgrass systems using the Daycent model. Colorado, Colorado State University, 2012, 69p.