



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
CAMPINAS

Instituto de Matemática, Estatística e
Computação Científica

THOMÁS FRANCISCO DE ABREU

Metamodelos de dinâmica de carbono orgânico do solo

Campinas

2021

Thomás Francisco de Abreu

Metamodelos de dinâmica de carbono orgânico do solo

Dissertação apresentada ao Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Matemática Aplicada.

Orientador: Stanley Robson de Medeiros Oliveira

Coorientadores: Laércio Luís Vendite
Luís Gustavo Barioni

Este trabalho corresponde à versão final da Dissertação defendida pelo aluno Thomás Francisco de Abreu e orientada pelo Prof. Dr. Stanley Robson de Medeiros Oliveira.

Campinas

2021

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca do Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica
Ana Regina Machado - CRB 8/5467

Ab86m Abreu, Thomás Francisco de, 1997-
Metamodelos de dinâmica de carbono orgânico do solo / Thomás Francisco de Abreu. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Stanley Robson de Medeiros Oliveira.

Coorientadores: Laércio Luís Vendite e Luís Gustavo Barioni.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica.

1. Modelo RothC. 2. Modelo Century. 3. Sequestro de carbono. 4. Gases do efeito estufa. 5. Solos - Teor de carbono. 6. Carbono orgânico. I. Oliveira, Stanley Robson de Medeiros. II. Vendite, Laércio Luís, 1954-. III. Barioni, Luís Gustavo. IV. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica. V. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Soil organic carbon dynamics metamodels

Palavras-chave em inglês:

RothC model

Century model

Carbon sequestration

Greenhouse gases

Soils - Carbon content

Organic carbon

Área de concentração: Matemática Aplicada

Titulação: Mestre em Matemática Aplicada

Banca examinadora:

Stanley Robson de Medeiros Oliveira [Orientador]

Estevão Esmi Laureano

Carlos Eduardo Pellegrino Cerri

Data de defesa: 14-04-2021

Programa de Pós-Graduação: Matemática Aplicada

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-7734-5582>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/0401258673158107>

**Dissertação de Mestrado defendida em 14 de abril de 2021 e aprovada
pela banca examinadora composta pelos Profs. Drs.**

Prof(a). Dr(a). STANLEY ROBSON DE MEDEIROS OLIVEIRA

Prof(a). Dr(a). ESTEVÃO ESMI LAUREANO

Prof(a). Dr(a). CARLOS EDUARDO PELLEGRINO CERRI

A Ata da Defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria de Pós-Graduação do Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica.

Agradecimentos

Aos meus pais e minha irmã, por todo suporte e carinho durante toda minha vida.

Aos meus amigos, por todas as risadas, momentos de descontração e desconstrução que me proporcionam.

Aos meus orientadores, por todo o ensinamento e suporte durante o período de pós-graduação.

A Luis Gustavo Barioni, por todo o tempo, ensinamentos, suporte e dedicação a este trabalho.

A Alexandre e Ana Elisa, por todo suporte, apontamentos relevantes à pesquisa e disponibilidade.

Aos meus colegas da Embrapa Informática Agropecuária pelo conhecimento compartilhado e a ajuda no decorrer do trabalho.

À Universidade Estadual de Campinas e a Embrapa Informática Agropecuária pela oportunidade de desenvolvimento desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

Resumo

A matéria orgânica é um componente do solo com importante papel nos fluxos de nutrientes para crescimento das plantas. Ademais, por seu conteúdo de carbono, ela é extremamente relevante no contexto das emissões e remoções de gases de efeito estufa da atmosfera. Estima-se que o solo seja o maior reservatório terrestre de carbono orgânico, com massa superior à de carbono atmosférico. Assim, mudanças nos estoques de carbono do solo podem causar grandes impactos ao meio ambiente. É necessário, portanto, instrumentalizar a avaliação dos impactos de práticas de manejo do solo de forma a identificar estratégias mais sustentáveis e economicamente viáveis, que preservem ou aumentem o carbono do solo por meio de sequestro do carbono atmosférico. Modelos da dinâmica da matéria orgânica do solo são essenciais nesse contexto. Entretanto, os modelos multicompartimentais existentes têm limitações importantes no contexto de políticas públicas e no mercado de carbono nos quais apenas o carbono total é monitorado. O objetivo deste trabalho é desenvolver dois metamodelos de dinâmica de carbono do solo com um único compartimento (estoque) de carbono. Os metamodelos foram desenvolvidos com base nos renomados modelos RothC e Century. As estimativas de carbono total do solo geradas pelos metamodelos foram comparadas as simulações geradas pelos modelos originais para verificação de acurácia. Comparações dos modelos originais com os metamodelos mostraram que os erros absolutos nas estimações para os estoques de carbono menores que 0,2%. Conclui-se que os metamodelos desenvolvidos nesta pesquisa podem ser utilizados para reproduzir a trajetória do estoque total de carbono do solo dos modelos RothC e Century com suficiente acurácia, utilizando apenas um estoque de carbono e dois parâmetros estimados empiricamente.

Palavras-chave: RothC, Century, sequestro de carbono, estoque de carbono no solo, emissões de GEE.

Abstract

Organic matter is a soil component with an important role in the flow of nutrients for plant growth. Further, the soil's organic matter, due to its carbon content, is an important element in the context of atmospheric flows of greenhouse gases. The soil is regarded as the largest terrestrial reservoir of organic carbon, with a mass higher than that of atmospheric carbon. Thus, changes in soil carbon stocks can cause major impacts on the environment. It is necessary, therefore, to instrumentalize the assessment of the impacts of soil management practices in order to identify more sustainable and economically viable strategies that preserve or increase soil carbon and, consequently, the sequestration of atmospheric carbon. Models of the dynamics of soil organic matter are essential in this context. However, the existing multi-compartmental models have important limitations in the context of the carbon market and governmental policies in which only total carbon is monitored. The objective of this work is to develop soil carbon dynamics metamodels with a single carbon compartment (stock) to meet the demands of governments and the carbon market. The metamodels were developed based on the renowned RothC and Century models. The estimates of total soil carbon generated by the metamodels were compared to the simulations generated by the original models to verify accuracy. Comparisons of the original models with the metamodels showed that the absolute errors in the estimates for carbon stocks were below 0.2%. It is concluded that the metamodels developed in this research can be used to reproduce the trajectory of the total soil carbon stock of the RothC and Century models using only one stock and two parameters which can be empirically estimated.

Keywords: RothC, Century, carbon sequestration, soil organic carbon stocks, GHG emissions.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estoques da Matéria Orgânica do Solo. Fonte: Adaptado de (Bot, Benites, 2005)	16
Figura 2 – Estrutura dos estoques do modelo RothC. Fonte: Adaptado de (Scharnagl, 2010)	19
Figura 3 – Estrutura do modelo Century. Fonte: o autor.	23
Figura 4 – Comparação entre as trajetórias dos estoques de carbono orgânico do solo: RothC e modelo de um único compartimento	28
Figura 5 – Comparação das simulações de carbono total entre o metamodelo e o RothC	35
Figura 6 – Erros relativos obtidos ao comparar o metamodelo com o RothC	36
Figura 7 – Trajetória de $\rho(t)$ durante a simulação	37
Figura 8 – Simulação geradas a partir de alterações em C^* e $\rho(t)$ e atribuição de ruídos	37
Figura 9 – Simulação geradas após a calibração dos parâmetros C^* e $\rho(t)$ e atribuição de ruídos	38
Figura 10 – Comparação das simulações de carbono total entre o metamodelo e o Century	39
Figura 11 – Erros relativos obtidos ao comparar o metamodelo com o Century	39

Lista de tabelas

Tabela 1 – Taxas de decomposição k_i por estoque.	21
Tabela 2 – Exemplo de cálculo para <i>accTSM</i> D	22
Tabela 3 – Taxa de decomposição máxima de cada estoque	24
Tabela 4 – Descrição dos parâmetros utilizados no desenvolvimento do metamodelo baseado no RothC	29
Tabela 5 – Descrição dos parâmetros utilizados no desenvolvimento do metamodelo baseado no Century	31

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Hipótese	14
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Matéria Orgânica do Solo	15
2.2	Carbono orgânico do solo	16
2.3	Modelos matemáticos	17
2.4	RothC	18
2.4.1	Coeficientes de particionamento	19
2.4.2	Fatores de modificação de taxa de decomposição	20
2.5	Century	21
2.5.1	Decomposição de carbono	22
2.5.2	Variáveis auxiliares	23
2.6	Metamodelos	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	Desenvolvimento dos metamodelos	27
3.1.1	RothC: equações diferenciais	28
3.1.2	Century: equações diferenciais	30
3.1.3	Cálculo de C^*	32
3.1.4	Cálculo de $C(t)$	32
3.1.5	Cálculo de $\rho(t)$	33
3.2	Implementação, Dados e Análises	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	RothC	35
4.2	Century	38
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
	Referências	42

1 Introdução

A matéria orgânica do solo (MOS) é um componente do solo responsável pela ciclagem e retenção de nutrientes, agregação do solo, dinâmica de água e fonte de energia para a atividade biológica. Sua composição é o resultado de diversos processos físicos, químicos e biológicos, influenciados por fatores externos, tais como o clima; a textura, a mineralogia, o manejo e a umidade do solo; material de origem da matéria orgânica. A MOS retém todo o carbono orgânico do solo (COS) e está associada ao fluxo de diversos gases de efeito estufa (GEE), o mais importante deles sendo o CO_2 (Roscoe, Boddey, Salton, 2006).

Em decorrência da acentuação das mudanças climáticas globais, pesquisadores e agricultores passaram a buscar práticas de manejo do solo mais sustentáveis com balanço mais favorável do CO_2 entre o solo e a atmosfera i.e., com remoções de carbono atmosférico superando as emissões. Essas pesquisas demandam o monitoramento constante do solo, além do levantamento do histórico de produção vegetal e manejo do solo nas áreas de interesse.

A determinação dos estoques de carbono do solo e sua dinâmica é cara e trabalhosa. Ademais os estoques de COS podem levar vários anos ou mesmo décadas para sofrerem alterações significativas (Smith, 2007; Stockmann et al., 2012). Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de novas ferramentas de monitoramento e projeção dos estoques de COS e de GEE, possibilitando a análise e tomada de decisão para práticas de manejo mais saudáveis e com menores impactos ambientais.

Uma alternativa viável para o monitoramento dos estoques de COS é o uso de modelos matemáticos de dinâmica de COS, uma vez que eles possuem a capacidade de estimar as taxas de variação do COS, usualmente por meio de simulações computacionais com métodos numéricos. A partir do monitoramento dos estoques de COS é possível analisar a eficácia de determinada prática de manejo do solo na conservação das taxas de MOS e COS. Ainda, por meio desses modelos, é possível prever o quanto as sucessões de cultivos e o manejo do solo empregado em uma localidade propicia ou propiciará em termos do sequestro de carbono e outros GEE da atmosfera, atribuindo a agricultura um papel importante no combate ao aquecimento global (Barioni et al., 2011).

Modelos matemáticos são ferramentas utilizadas para o estudo e análise de um fenômeno. Atualmente, diversas áreas do conhecimento fazem uso de modelos matemáticos, tais como epidemiologia, meteorologia e a agricultura. Os modelos matemáticos são desenvolvidos a partir de um conjunto de equações diferenciais responsáveis por simular o fenômeno estudado de acordo com as variáveis que o usuário desejar. A utilização destes

modelos deve ser combinada de calibração, avaliação, e análises dos resultados, no intuito de proporcionar uma melhor eficácia ao modelo (Barioni et al., 2011; Campbell, 2018).

Existem diversos modelos matemáticos para a dinâmica de COS, alguns deles são o Century (Parton et al., 2001), RothC (Coleman, Jeckinson, 2014), NCSOIL (Molina et al., 1983), DAISY (Hansen et al., 1991), DNDC (Li et al., 1992) e CANDY (Franko et al., 1997). Entretanto, para a realização deste trabalho serão utilizados os modelos Century e RothC, devido à ampla utilização destes modelos em trabalhos da área e trabalhos anteriores realizados com tais modelos no Brasil. O Century é o modelo mais utilizado nas pesquisas brasileiras e sua arquitetura consiste de um submodelo de MOS, no qual é possível fazer um estudo da dinâmica de COS, enquanto que o RothC é um modelo que simula apenas a dinâmica de COS, sendo reconhecido, também, por diversos estudiosos da área.

O Century é um modelo desenvolvido por Bill Parton e colaboradores (Parton et al., 2001) para simular o crescimento das plantas, ciclo dos nutrientes e a dinâmica da matéria orgânica do solo. Ele é composto por três submodelos, a saber: “matéria orgânica do solo”, “água e temperatura do solo” e “produção e gerenciamento de plantas”. Neste estudo, será utilizado apenas o submodelo de MOS, pois nele está contido a dinâmica de COS. O submodelo de MOS é composto por 8 estoques (compartimentos), sendo eles: estrutural da parte aérea, estrutural da parte raiz, metabólico da parte aérea, metabólico da parte raiz, microbiano da superfície, ativo, lento e passivo. No processo de decomposição desses estoques de matéria orgânica há perda significativa de CO₂. Existe, ainda, uma pequena parcela de carbono que é lixiviado.

O RothC é um modelo de dinâmica de COS desenvolvido por Coleman e Jeckinson em parceria com o instituto de pesquisa Rothamsed (Coleman, Jeckinson, 2014). O modelo vem sendo amplamente utilizado por pesquisadores da área (Cerri et al., 2007; Skjemstad et al., 2014; Scharnagl et al., 2010). O modelo é composto por quatro estoques dinâmicos e parcela de matéria orgânica inerte calculada algebricamente a partir dos estoques dinâmicos. Os estoques ativos são: material da planta decomponível, material da planta resistente, material biológico e material humificado. O modelo considera que as perdas de carbono pelo solo se dão em forma de dióxido de carbono e que em toda decomposição é gerado três tipos de matéria: biológico (decompõe rapidamente), humificado (decompõe lentamente) e o dióxido de carbono (CO₂).

Propõe-se neste trabalho o desenvolvimento de metamodelos baseados no RothC e Century. A metamodelagem é o processo de desenvolver um modelo tendo como referência um modelo já existente e não o sistema sendo modelado. O metamodelo tem o objetivo de gerar resultados similares ao modelo de referência, mas com características mais interessante do ponto de vista computacional ou estatístico.

As principais contribuições desse trabalho são desenvolver e avaliar metamodelos

dos modelos RothC e Century para representar a mesma dinâmica de carbono total dos modelos originais, com apenas um estoque e dois parâmetros empiricamente identificáveis. Todos os modelos originais e seus respectivos metamodelos foram implementados usando o software R, para que fossem possíveis análises acerca de seus desempenhos nas simulações.

1.1 Hipótese

Metamodelos de um compartimento, baseados nos modelos RothC e Century, são capazes de reproduzir a dinâmica de carbono orgânico do solo gerada pelos modelos multicompartimentais originais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e validar dois metamodelos de dinâmica de carbono orgânico do solo, baseados nos modelos RothC e Century.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Definir a equação diferencial de um único estoque de carbono para ambos os metamodelos, com base na equação apresentada por Stanford e Smith (1972).
2. Realizar adaptações nos modelos RothC e Century para a criação de metamodelos de dinâmica de COS.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Matéria Orgânica do Solo

A matéria orgânica do solo (MOS) está diretamente relacionada à qualidade do solo, uma vez que ela é responsável pela ciclagem e retenção de nutrientes, agregação do solo, dinâmica de água e produção de energia para a atividade biológica (Roscoe, Boddey, Salton, 2006).

A formação da MOS é constituída por processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem durante anos, sendo afetados, principalmente, por fatores como tempo, clima, material de origem e topografia. Estes processos estão ligados à decomposição de resíduos das plantas e da fauna do solo e, ainda, ao transporte e acúmulo de produtos biológicos (Roscoe, Boddey, Salton, 2006).

A MOS contém todo o carbono orgânico do solo e é composta por três reservatórios principais: MOS transitória, MOS humificada e biomassa. A MOS transitória é formada por resíduos de plantas, organismos do solo e materiais orgânicos produzidos pela microbiota e raízes. A MOS humificada é formada por materiais recalcitrantes e matérias carbonizadas. Por fim, a biomassa é formada por mesofauna, macrofauna e a microbiota do solo (Roscoe, Boddey, Salton, 2006). Ainda, os estoques de MOS podem ser caracterizados de acordo com o tempo necessário para a decomposição completa dos produtos presentes no solo, dessa forma, a MOS pode ser dividida em estoques ativos e estoques passivos, no qual os ativos possuem a decomposição mais acelerada (meses ou anos) enquanto os passivos possuem a decomposição mais lenta (séculos ou milênios) (FAO, 2017). A Figura 1 apresenta um esquema detalhado dos estoques da MOS.

Diversos fatores podem acelerar a degradação da MOS, tais como o revolvimento do solo, destruição dos agregados do solo, maior fragmentação e incorporação dos resíduos vegetais e diminuição da cobertura do solo (Bayer, Mrelniczuk, 1999). Vale ressaltar que, devido à alta relação da dinâmica da matéria orgânica com a qualidade do solo, mesmo pequenas perdas de MOS pode resultar na aceleração do processo de degradação do solo (Roscoe, Boddey, Salton, 2006).

Em solos aráveis, por exemplo, aumentar a quantidade de MOS humificada usando agrotécnicas padrão, tais como adubação verde e fertilização orgânica, é uma tarefa difícil e pode demorar décadas. Entretanto, a perda substancial de MOS por decomposição, mineralização, erosão, lixiviação, ação humana ou causas naturais podem levar apenas algumas estações. Ou seja, práticas de manejo do solo mais sustentáveis e que conservem ou aumentem as taxas de MOS são necessárias (Ondrasek et al., 2018).

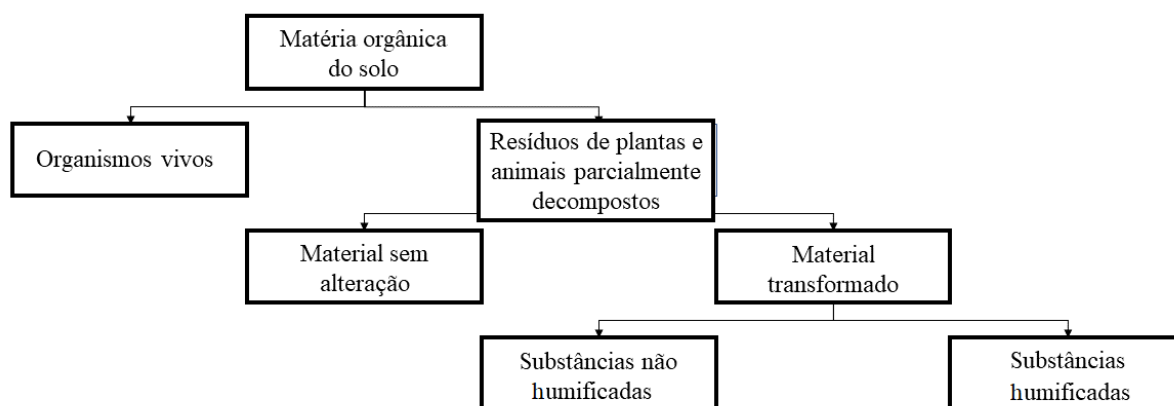


Figura 1 – Estoques da Matéria Orgânica do Solo. Fonte: Adaptado de (Bot, Benites, 2005)

2.2 Carbono orgânico do solo

O carbono orgânico do solo (COS) é um dos componentes da MOS, ele faz parte do ciclo do carbono, que envolve o solo, a vegetação, o oceano e a atmosfera (FAO, 2017). O solo é o maior estoque de carbono orgânico terrestre, contendo maiores taxas que a atmosfera e vegetação combinadas (FAO, 2017).

Por ser o maior estoque terrestre de carbono orgânico, mudanças feitas nos estoques de COS poderiam causar grandes impactos na concentração de carbono na atmosfera (Stockmann et al., 2012). As emissões de carbono na atmosfera realizadas pelo solo são em forma de dióxido de carbono (CO_2), causada pela decomposição ou mineralização da MOS por microorganismos e a exportação de carbono para rios e oceanos como carbono dissolvido ou como parte da erosão do solo (FAO, 2017).

O nível de carbono orgânico do solo é determinado por diferentes fatores, alguns exemplos são: temperatura, umidade, quantidade de argila, chuva, etc. (Smith, 2007; Coleman, Jeckinson, 2014). A quantidade de carbono que entra no solo está relacionada à produção primária líquida (PPL) da vegetação e às exportações de carbono pela colheita. A PPL entra no solo através da senescência da parte aérea das plantas, de suas raízes, da decomposição da liteira ou de estruturas fragmentadas de plantas, dependendo principalmente de temperatura, luz e umidade (Smith, 2007).

Maximizar a produtividade da agricultura e aplicar melhores práticas de manejo do solo poderia diminuir as emissões ou, até mesmo, restaurar o carbono do solo (Smith, 2007). O desenvolvimento de melhores práticas de manejo do solo depende de pesquisas que explorem práticas de manejo conservacionistas e saudáveis, sendo necessário o monitoramento dos estoques de COS durante anos (Smith, 2007; Stockmann et al., 2012).

O futuro da pesquisa de carbono orgânico do solo depende da comunicação entre a sociedade científica e do setor produtivo, ou seja, as pesquisas devem ser compatíveis, observáveis, alcançáveis e principalmente econômicas (Stockmann et al., 2012). Porém, existem barreiras para a utilização de melhores práticas de manejo do solo, sendo que a principal delas é que países em desenvolvimento são orientados pela pobreza e, em sua maioria, priorizam a segurança alimentar e a lucratividade (Smith, 2007).

A detecção de mudanças nos estoques de COS pode ser obstruída por diversos fatores, entre eles o clima, tipo de vegetação e características físicas do solo, tornando necessário o uso de uma ferramenta para a mensuração e monitoramento destes estoques (Conant, Smith, Paustian, 2003). Os modelos matemáticos são uma alternativa viável para mensurar os estoques de carbono, promovendo ao estudo da produtividade do solo e sequestro de carbono uma ferramenta mais rápida e econômica (Stockmann et al., 2012).

2.3 Modelos matemáticos

Modelos matemáticos são ferramentas utilizadas para o estudo de fenômenos por meio de representações matemáticas. Ao realizar as previsões acerca do fenômeno estudado, o modelo matemático auxilia a compreensão do comportamento deste fenômeno, bem como na tomada de decisão de novas estratégias de tratamento dele (Tedeschi, 2006; Barioni et al., 2011).

Normalmente, um modelo matemático é classificado como empírico ou mecanicista. Modelos empíricos podem ser desenvolvidos por regressão multivariada, técnicas estatísticas ou aprendizado de máquinas, enquanto que modelos mecanicistas usam hipóteses básicas para desenvolver uma análise matemática do sistema. Entretanto, modelos mecanicistas podem ter dificuldades para prever fenômenos biológicos de grande escala e promover análises confiáveis acerca destes fenômenos (Campbell, 2018).

O uso de modelos matemáticos para pesquisa deve possuir objetivos específicos, parametrizações, validações e aplicações com dados disponíveis. A falta de dados observáveis para o desenvolvimento do modelo é um fator limitante para o pesquisador e impede que o modelo descreva por completo o fenômeno biológico estudado (Barioni et al., 2011).

Entretanto, mesmo com suas limitações, modelos matemáticos são ferramentas importantes para o estudo de fenômenos biológicos, uma vez que fazem projeções pertinentes às perguntas de pesquisa, além de possibilitar a avaliação de situações atípicas (Barioni et al., 2011).

Existem diversos modelos matemáticos de dinâmica de COS na literatura, entre eles estão: Century (Parton et al., 2001), RothC (Coleman, Jeckinson, 2014), NCSOIL (Molina et al., 1983), DAISY (Hansen et al., 1991), DNDC (Li et al., 1992) e CANDY

(Franko et al.,1997). Um dos problemas apontados nesses modelos é a falta de adaptação dos mesmos para simular os estoques de carbono para regiões com características climáticas diferentes das quais foram desenvolvidos, gerando a necessidade de novas calibrações e estudos para cada região que se pretende usar o modelo (Moreno et al., 2017; Brilli et al., 2017).

Análises estatísticas adequadas são necessárias para o bom desenvolvimento de um modelo, assim como sua avaliação e fases de revisão. A avaliação de adequação de um modelo é possível através da combinação de diversas análises estatísticas e adequada investigação sobre os propósitos que cada modelo foi desenvolvido. A avaliação dos erros que o modelo produz pode melhorar o processo de modelagem, uma vez que pode-se definir novas análises para identificar estas falhas e incorporá-las no modelo para fortalecer o processo de aprendizagem e explorar os princípios em desenvolver um modelo com melhor performance (Tedeschi, 2006).

Forrester (1961) enfatiza que a validade de um modelo matemático deve ser julgado por sua adequação para um propósito particular, ou seja, precisa ser avaliado para determinar se é válido, assim como, se atende o que se é esperado dele.

2.4 RothC

O RothC é um modelo de dinâmica de carbono no solo desenvolvido por Kevin Coleman e David Jeckinson em parceria com o instituto de pesquisa Rothamsted. Inicialmente, o modelo foi criado para superfícies não alagadas (superfícies áridas), porém este mesmo modelo já foi usado para estimar as mudanças de carbono do solo em outros tipos de solo e com diferentes abordagens matemáticas (Cerri et al., 2007; Skjemstad et al., 2014; Scharnagl et al., 2010).

As variáveis de entrada do modelo, dados necessários para a simulação, são: 1) chuva mensal (mm), 2) evaporação tanque classe A (mm), 3) média da temperatura do ar mensal (°C), 4) quantidade de argila do solo (porcentagem), 5) estimativa da decomposição do material da planta inicial, 6) cobertura do solo (com ou sem vegetação), 7) taxas mensais dos resíduos das plantas, 8) taxas mensais de adubo, se houver, 9) profundidade do solo examinado (cm). As variáveis de saída do modelo, dados gerados pela simulação, são: total de COS, o carbono da biomassa microbiana e o carbono 14 (Δ^{14}) do solo (Coleman, Jeckinson, 2014).

As simulações são feitas por meses, sendo que podem ser geradas em períodos de anos ou séculos. Ainda, o RothC pode ser configurado de duas formas: "forward" e "inverse". A primeira é utilizada para gerar as variáveis de saída do modelo a partir de suas variáveis de entrada, enquanto que a segunda é usada para gerar as variáveis de entrada do modelo a partir de suas variáveis de saída. A função inversa é importante, uma vez

que algumas variáveis de entrada são de difícil obtenção, como é o caso da estimativa da decomposição do material da planta inicial (Coleman, Jeckinson, 2014).

O RothC considera quatro estoques ativos e uma pequena quantidade de matéria orgânica inerte. Os quatro estoques ativos são: material da planta decomponível (DPM), material da planta resistente (RPM), biomassa microbiana (BIO) e matéria orgânica humidificada (HUM). A Figura 2 ilustra a estrutura do modelo:

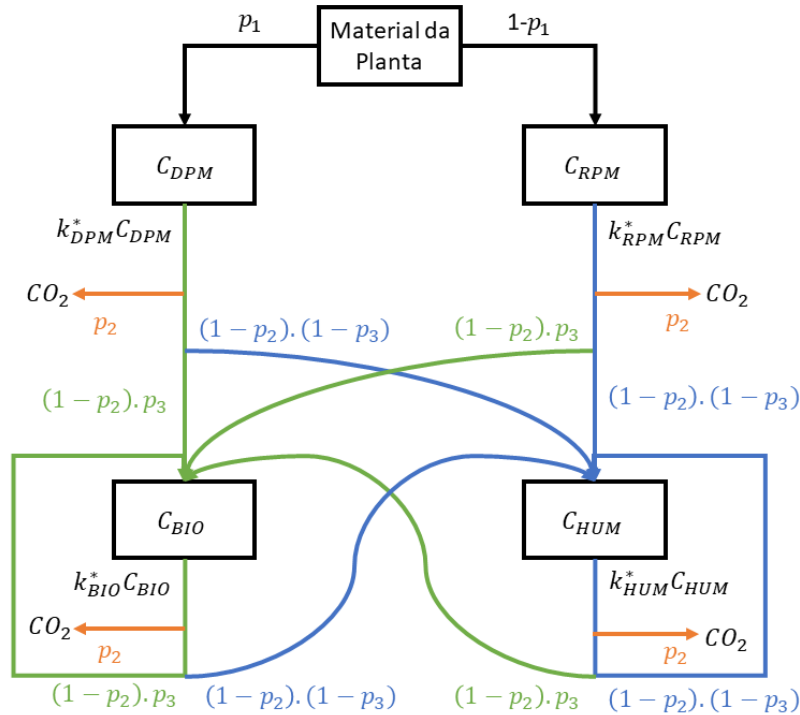


Figura 2 – Estrutura dos estoques do modelo RothC. Fonte: Adaptado de (Scharnagl, 2010)

A compreensão do funcionamento do RothC depende do entendimento de seus coeficientes de particionamento (p_1 , p_2 , p_3) e de seus fatores de modificação de taxa de decomposição (a , b , c) que sofrem efeito da temperatura, umidade e cobertura do solo, respectivamente. A seguir, são apresentadas duas subseções, intituladas "coeficientes de particionamento" e "fatores de modificação de taxa de decomposição".

2.4.1 Coeficientes de particionamento

O RothC possui três coeficientes de particionamento, p_1 , p_2 e p_3 . O coeficiente de particionamento p_1 é uma fração entre os estoques DPM e RPM, dado por:

$$p_1 = \frac{C_{DPM}}{C_{RPM}} \tag{2.1}$$

Em Colemann e Jeckinson (2014) são apresentadas três estimativas utilizadas para este parâmetro:

- **Maioria das colheitas e pastagens aprimoradas:** $C_{DPM}/C_{RPM} = 1.44$, $C_{DPM} = 59\%$ do material da planta e $C_{RPM} = 41\%$.
- **Pastagens não aprimoradas e solos sem cobertura:** $C_{DPM}/C_{RPM} = 0.67$, $C_{DPM} = 40\%$ do material da planta e $C_{RPM} = 60\%$.
- **Florestas decíduais e tropicais:** $C_{DPM}/C_{RPM} = 0.25$, $C_{DPM} = 20\%$ do material da planta e $C_{RPM} = 80\%$.

O coeficiente de particionamento p_2 representa a parte de CO_2 que é liberada para a atmosfera e a formação de $C_{BIO} + C_{HUM}$ após o processo de decomposição. p_2 é uma função da quantidade de argila do solo (%argila) e é dado pela equação (Colemann, Jeckinson, 2014):

$$p_2 = 1.67(1.85 + 1.60\exp(-0.0786\%argila)), \quad (2.2)$$

neste sentido, a taxa de CO_2 liberado através da decomposição corresponde a $\frac{p_2}{p_2 + 1}$ e a taxa de $C_{BIO} + C_{HUM}$ corresponde a $\frac{1}{p_2 + 1}$.

Por último, o coeficiente de particionamento p_3 é um valor fixo que divide o fluxo entre os estoques C_{BIO} e C_{HUM} . Em Scharnagl et al. (2010) este valor é definido como 0.46.

2.4.2 Fatores de modificação de taxa de decomposição

A taxa de decomposição atual k_i^* do RothC é definida como a multiplicação da taxa de decomposição constante k_i com os fatores de modificação de taxa a, b, c , ou seja,

$$k_i^* = k_i \cdot a \cdot b \cdot c, \quad (2.3)$$

A Tabela 1 apresenta os valores de k_i para os estoques ativos do RothC, apresentados por Colemann e Jeckinson (2014).

Os fatores de modificação de taxa a, b, c são efeitos da temperatura, umidade e cobertura do solo, respectivamente. Cada um destes fatores são definidos por uma equação, apresentadas por Colemann e Jeckinson (2014). Iniciando pelo fator de modificação de taxa a , para temperatura, tem-se que

$$a = \frac{47.91}{1 + e^{\frac{106.06}{T+18.27}}}, \quad (2.4)$$

Tabela 1 – Taxas de decomposição k_i por estoque.

Estoque	Valor
DPM	10
RPM	0.3
BIO	0.66
HUM	0.02

no qual T é a temperatura média mensal do ar.

O fator de modificação b , para umidade, depende do déficit máximo de umidade do solo superficial ($maxTSMD$) e a taxa de TSMD acumulada ($accTSMD$). Esse fator é dado por $b = 1$, se $acc.TSMD < 0.444max.TSMD$, caso contrário,

$$b = 0.2 + \left(1.0 - 0.2 \cdot \frac{max.TSMD - acc.TSMD}{max.TSMD - 0.444max.TSMD} \right). \quad (2.5)$$

O cálculo para $maxTSMD$ depende da profundidade do solo. Para profundidades entre 0 e 23 cm, é dado:

$$maxTSMD = -(20.0 + 1.3(\%argila - 0.01\%argila^2)) \quad (2.6)$$

Para outras profundidades, deve-se dividir o $maxTSMD$ por 23 e depois multiplicar pela profundidade real em centímetros. Porém, este cálculo é feito apenas para quando o solo é vegetado. Para solos sem vegetação, divide-se o $maxTSMD$ por 1.8 e o resultado é definido como $BareTSMD$.

Já o $accTSMD$ é calculado a partir do primeiro mês que 0.75x(evaporação tanque classe A) excede as taxas de chuva até atingir o $maxTSMD$. Caso a evapotranspiração potencial não seja conhecida, Coleman e Jackinson (2014) sugerem que os pesquisadores utilizem os valores definidos no estudo de Muller (1982).

Para melhor compreender o cálculo do $accTSMD$, observe a Tabela 2.

Por fim, o fator de modificação taxa c , para cobertura do solo, é dado por 0.6, se o solo possui vegetação e 1.0, se o solo não possui vegetação.

2.5 Century

O Century é um modelo matemático desenvolvido por Bill Parton e colaboradores capaz de simular o crescimento das plantas, ciclo dos nutrientes e a dinâmica da matéria orgânica do solo para diferentes tipos de solo (Parton et al., 2001).

Tabela 2 – Exemplo de cálculo para *accTSMD*

Mês	Chuva (C)	E. T. classe A (E)	0.75*E	C-0.75*E	acc.TSMD
Jan	74	8	6.00	68.00	0.00
Fev	59	10	7.50	51.50	0.00
Mar	62	27	20.25	41.75	0.00
Abr	51	49	36.75	14.25	0.00
Mai	52	83	62.25	-10.25	-10.25
Jun	57	99	74.25	-17.25	-27.50
Jul	34	103	77.25	-43.25	-44.94
Ago	55	91	68.25	-13.25	-44.94
Set	58	69	51.75	6.25	-38.69
Out	56	34	25.50	30.50	-8.19
Nov	75	16	12.00	63.00	0.00
Dez	71	8	6.00	65.00	0.00

O modelo usa passo de tempo mensal e as variáveis de entrada são: 1) precipitação mensal, 2) média mensal do mínimo e máximo da temperatura do ar, 3) textura do solo, 4) lignina, nitrogênio, sulfato e fósforo presentes no material da planta e 5) taxas de nitrogênio do solo e atmosfera.

O Century é composto por diferentes submodelos, sendo que este trabalho possui interesse no submodelo de matéria orgânica do solo, pois ele simula a dinâmica de carbono e nutrientes do solo. A Figura 3 ilustra a estrutura deste submodelo.

Os estoques de carbono do Century são: estrutural da parte aérea (EPA), estrutural da parte raiz (EPR), metabólico da parte aérea (MPA), metabólico da parte raiz (MPR), microbiano da superfície (MS), lento (LEN), passivo (PAS) e ativo (AT).

A compreensão do modelo Century é dependente da explicação dos processos de decomposição que ocorrem nos estoques, bem como as variáveis auxiliares presentes em sua composição. A seguir, estão organizadas duas seções, intituladas "decomposição de carbono" e "variáveis auxiliares".

2.5.1 Decomposição de carbono

A decomposição de cada estoque de carbono é calculada usando a seguinte equação:

$$\frac{dC}{dt} = k_i \cdot A \cdot C_i, i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\} \quad (2.7)$$

onde cada elemento de i equivale ao índice do estoque, i.e. EPA, EPR, AT, MS, MPA, MPR, LEN, PAS, respectivamente; C_i é a quantidade de carbono no estoque, k_i é taxa

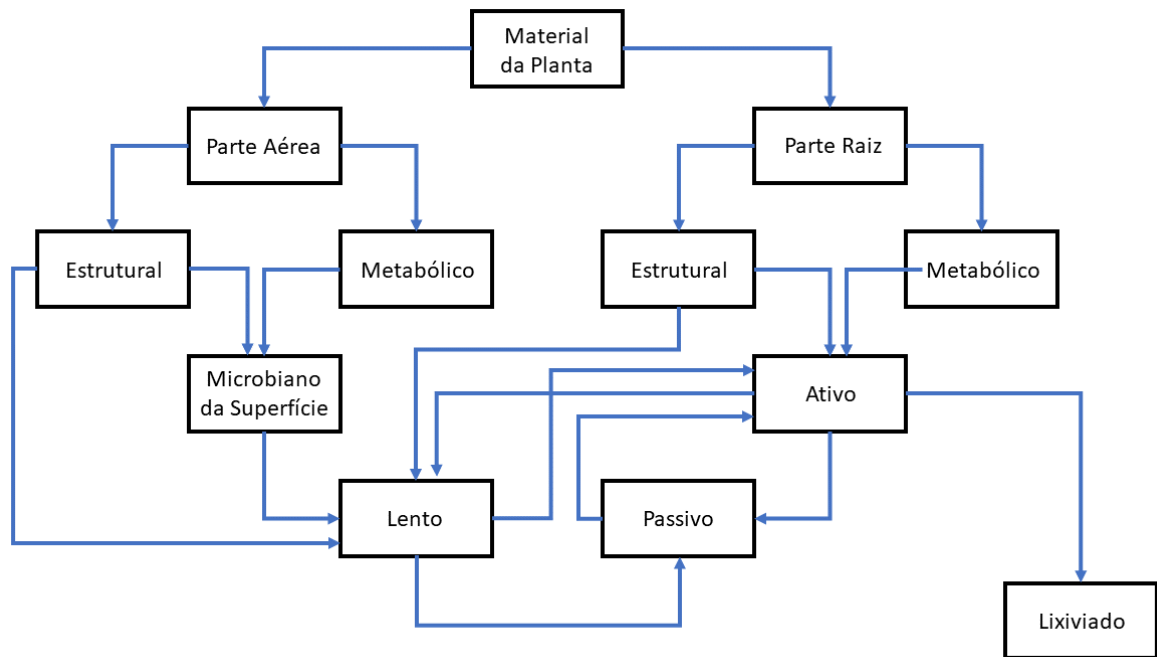


Figura 3 – Estrutura do modelo Century. Fonte: o autor.

de decomposição de referência intrínseca do estoque (Tabela 3); A é efeito combinado da umidade e temperatura sobre a decomposição.

Os estoques 4, 5, 6, 7 e 8 possuem k_i fixos, enquanto os estoques 1, 2 e 3 possuem k_i variáveis, pois sofrem efeitos do teor de lignina e textura do solo. Sendo assim, as equações dos estoques 1, 2 e 3 são dadas por:

$$\frac{dC}{dt} = k_i \cdot A \cdot C_i \cdot L_c, \quad i = 1, 2, \quad (2.8)$$

$$\frac{dC}{dt} = k_i \cdot A \cdot C_i \cdot T_m, \quad i = 3, \quad (2.9)$$

onde L_c é o impacto do conteúdo de lignina, dado por $L_c = e^{-3L_s}$, L_s é o material estrutural na decomposição estrutural e T_m corresponde ao efeito da textura do solo, sendo representada por $T_m = (1 - 0.75T)$.

2.5.2 Variáveis auxiliares

O Century considera os efeitos da temperatura, umidade, precipitação mensal e evaporação tanque classe A para definir os fluxos de carbono entre os estoques.

A função temperatura (T_E) depende da temperatura média máxima (t_1) e da mínima (t_2) do solo. Estas equações são dadas por:

Tabela 3 – Taxa de decomposição máxima de cada estoque

i	Estoque	$k_i \text{ ano}^{-1}$
1	EPA	3.9
2	EPR	4.9
3	AT	7.3
4	MS	6.0
5	MPA	14.8
6	MPR	18.5
7	LEN	0.20
8	PAS	0.0045

$$t_1 = \frac{45 - T}{45 - 35}, \quad (2.10)$$

$$t_2 = e^{0.076(T_{so} - e^{2.63 \ln(t_1)})}, \quad (2.11)$$

$$T_E = e^{0.2 \ln(t_1) t_2}, \quad (2.12)$$

no qual T_{so} é a temperatura média do solo.

A função umidade depende da precipitação mensal (PPM) e da evaporação tanque classe A (ETCA), dada por: se $PPM/ETCA > 1,5$, então $U = 1 - 0.7(PPM/ETCA - 1.5)/1.5$ caso contrário, $U = (1/1 + 30e^{-8.5PPM/ETCA})$.

Os fluxos de saída (decomposição) dos estoques ativo e lento precisam ser melhor detalhados, pois sofrem efeito de diferentes elementos. Esses fluxos são dados por:

$$F_t = 0.17 - 0.68T \quad (2.13)$$

$$\Theta_{LIX} = (H2O30/18) \cdot (0.01 + 0.04 \cdot T_s) \quad (2.14)$$

$$\Theta_{AT}^{PAS} = 0.003 + 0.032 \cdot T_c \quad (2.15)$$

$$\Theta_{AT}^{LEN} = (1 - C_{ap} - C_{lix} - F_t) \quad (2.16)$$

no qual F_t é a fração de carbono perdido durante a respiração microbiana, Θ_{LIX} é a fração de carbono perdida por lixiviação, Θ_{AT}^{PAS} é a fração de carbono alocada para o estoque passivo, Θ_{AT}^{LEN} é a fração de carbono alocada para o estoque lento, T é conteúdo de *silte + argila*. $H2O30$ é a água lixiviada mensalmente dos 30cm de profundidade do solo ($\text{cm m\^e}s^{-1}$), T_s é o conteúdo de areia do solo, T_c é o conteúdo de argila do solo.

Por outro lado, os fluxos de saída do estoque lento são:

$$\Theta_{LEN}^{PAS} = 0.003 - 0.009 \cdot T_c \quad (2.17)$$

$$\Theta_{LEN}^{AT} = (1 - C_{lp} - 0.55) \quad (2.18)$$

nos quais Θ_{LEN}^{PAS} é a fração de carbono alocado para o estoque passivo e Θ_{LEN}^{AT} é a fração de carbono alocado para o estoque ativo.

Por fim, deve-se considerar a fração de carbono que é dividida entre os estoques metabólicos e estruturais, que é originada pela decomposição de resíduos vegetais, denominado F_m . A equação que define F_m é dada por:

$$F_m = 0.85 - 0.013 \cdot L/N \quad (2.19)$$

na qual F_m é a fração de resíduo vegetal alocado para o estoque metabólico e F_s é a fração de resíduo vegetal alocado para o estoque estrutural, dada por $F_s = 1 - F_m$.

2.6 Metamodelos

Metamodelos são modelos desenvolvidos para aproximar a relação entre as variáveis de entrada e saída de um modelo mais complexo, tornando as simulações mais baratas computacionalmente e permitindo análises mais detalhadas no decorrer da pesquisa (El-Beltagy, Nair, Keane, 1999).

Dennis e Torczon (1997) apontam que o objetivo de desenvolver esse tipo de modelo é minimizar a quantidade de análises durante o processo de otimização, porém mantendo a qualidade das estimativas do problema.

De acordo com Fang, Li, Subjianto (2005) algumas vantagens dos metamodelos são:

1) Estudo preliminar e visualização: a geração de gráficos é facilitada nos metamodelos, visto que eles usam funções em sua forma expressiva. Após gerar um gráfico é possível, por exemplo, fazer um estudo de máximos e mínimos da função e entender melhor as relações entre as variáveis do modelo.

2) Predição e otimização: técnicas de programação linear combinadas com um metamodelo podem encontrar pontos de máximo e mínimo analiticamente ou numericamente, ou seja, melhoram a predição das simulações e otimizam o modelo.

3) Análise sensitiva: metamodelos podem facilmente realizar análises sensitivas (quantificar e ranquear os efeitos das variáveis de entrada), uma vez que possui uma dimensão menor comparado ao modelo original, facilitando as integrações das funções.

4) Análise probabilística: análises probabilísticas em modelos multidimensionais tendem a ser complicadas e requerem aplicações de técnicas de Monte Carlo para

serem resolvidas. Dessa forma, devido à menor dimensionalidade dos metamodelos, eles podem ser uma melhor alternativa para análises probabilísticas.

5) Design robusto e design baseado na confiabilidade: um design robusto é um método que aumenta a qualidade do produto sem eliminar a variável de entrada, aumentando a otimização da robustez do sistema. Porém, para isso, é requerido uma série de avaliações do sistema, o que ficaria computacionalmente caro para os modelos originais, por isso aos metamodelos são melhores opções para essa prática.

Na literatura é possível identificar diversas técnicas utilizadas no desenvolvimento de um metamodelo, são exemplos: 1) *modelos de regressão gaussiana* (El-Beltagy, Nair, Keane, 1999), 2) *Template instantiation* (Emerson, Sztipanovits, 2006), e 3) *Trust-region methods* (Dennis, Torczan, 1997).

Neste trabalho o desenvolvimento dos metamodelos baseados no RothC e no Century baseou-se na aproximação analítica para um modelo com um único estoque de carbono, apresentada por Stanford e Smith (1972) e dada por:

$$\frac{dC}{dt} = k.(C^* - C) \quad (2.20)$$

na qual k é o coeficiente de decomposição do estoque, C^* é a taxa de carbono de equilíbrio e C é a taxa de carbono atual do estoque.

No capítulo “Materiais e Métodos” são apresentados os passos seguidos para o desenvolvimento dos metamodelos e as deduções matemáticas utilizadas para a definição da Equação (2.20).

3 Materiais e Métodos

3.1 Desenvolvimento dos metamodelos

Os metamodelos foram desenvolvidos baseando-se nos modelos RothC e Century. Assim como os modelos originais, os metamodelos foram implementados usando o software R, possibilitando a comparação das trajetórias de carbono entre os metamodelos e os modelos originais.

Ambos os metamodelos foram desenvolvidos a partir da equação diferencial de um único estoque, apresentada por Stanford e Smith (1972), dada por

$$\frac{dC}{dt} = k \cdot (C^* - C), \quad (3.1)$$

na qual k é o coeficiente de decomposição, C^* é o valor que o carbono se aproxima ao longo do tempo, ou seja, a concentração de carbono de equilíbrio e C é o concentração total de carbono. Esta equação pode ser resolvida analiticamente por:

$$C(t) = C_0 + (C^* - C_0) \cdot (1 - e^{-k \cdot t}). \quad (3.2)$$

A Figura 4 apresenta a comparação do RothC com a implementação de um modelo de um único compartimento usando as equações (3.1) e (3.2). Nesta simulação os estoques iniciais são iguais, assim como suas taxas de carbono de equilíbrio e os parâmetros de decomposição são fixos. Os dados utilizados nestas simulações são fictícios para um período de 20 anos.

Pode-se observar que as trajetórias dos modelos na Figura 4 apresentam desvios significativos entre elas, o que geraria problemas em processos de calibração e de assimilação de dados. A fim de aperfeiçoar a representação da trajetória original, neste trabalho será feita a suposição que o coeficiente de decomposição (k) pode ser definido como uma forçante, ou seja, uma função do tempo. Dessa forma, ao invés de um coeficiente de decomposição fixo, existe uma taxa de decomposição que altera a concentração de carbono com o passar do tempo, denominada forçante de decomposição ($\rho(t)$). Com esta suposição, a Equação (3.1) se torna

$$\dot{C}(t) = \rho(t) \cdot (C^* - C(t)) \quad (3.3)$$

sendo esta equação utilizada para a implementação dos metamodelos.

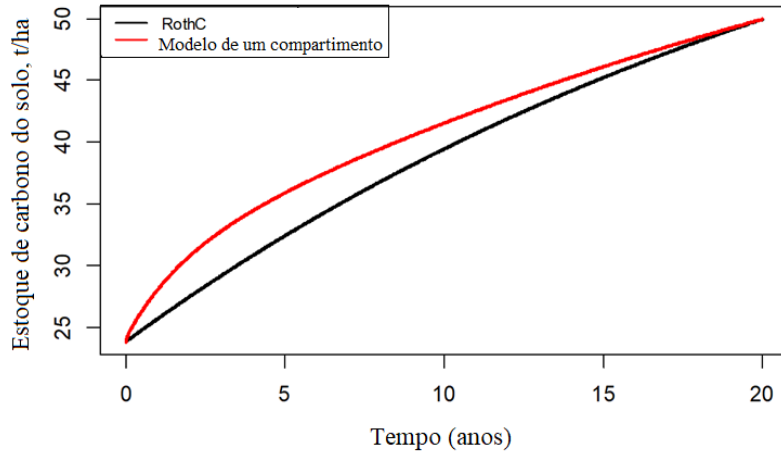


Figura 4 – Comparação entre as trajetórias dos estoques de carbono orgânico do solo: RothC e modelo de um único compartimento

As subseções a seguir apresentam as deduções matemáticas realizadas para definir $\rho(t)$, C^* e $C(t)$. Entretanto, inicialmente é apresentado as equações diferenciais dos estoques de carbono do RothC e do Century e suas representações vetoriais, possibilitando as deduções feitas neste trabalho.

3.1.1 RothC: equações diferenciais

Observando a Figura 2 e considerando que as equações diferenciais dos estoques de carbono do RothC são as taxas de carbono atual no estoque menos a taxa de decomposição (TD), as equações diferenciais do RothC são dadas por:

$$\begin{cases} \dot{C}_{DPM} = Wp_1 - C_{DPM} \cdot k_{DPM}^* \\ \dot{C}_{RPM} = W(1 - p_1) - C_{RPM} \cdot k_{RPM}^* \\ \dot{C}_{BIO} = C_{DPM}k_{DPM}^*\theta + C_{RPM}k_{RPM}^*\theta + C_{HUM}k_{HUM}^*\theta - (1 - \theta)C_{BIO}k_{BIO}^* \\ \dot{C}_{HUM} = C_{DPM}k_{DPM}^*\alpha + C_{RPM}k_{RPM}^*\alpha + C_{BIO}k_{BIO}^*\alpha - (1 - \alpha)C_{HUM}k_{HUM}^* \end{cases}$$

Neste sistema W é a produção primária líquida, p_1 , θ e α são coeficientes de particionamento (CP) de carbono, C_i é o carbono atual no estoque e k_i^* é a taxa de decomposição (TD) do estoque.

Estas equações podem ser sintetizadas numa forma vetorial da seguinte maneira:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} C_{DPM} \\ C_{RPM} \\ C_{BIO} \\ C_{HUM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ \theta & \theta & (\theta - 1) & \theta \\ \alpha & \alpha & \alpha & (\alpha - 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{DPM}^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{RPM}^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{BIO}^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{HUM}^* \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} C_{DPM} \\ C_{RPM} \\ C_{BIO} \\ C_{HUM} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W \cdot p_1 \\ W \cdot (1 - p_1) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Adotando a matriz de coeficientes de particionamento como Θ , a matriz de coeficientes de degradação como \mathbf{K} e o vetor de entradas de carbono como \mathbf{b} , obtém-se:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{C}(t) = \Theta\mathbf{K}\mathbf{C}(t) + \mathbf{b}, \quad (3.4)$$

a fim de facilitar a notação, define-se $\mathbf{A} = \Theta\mathbf{K}$, resultando em:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{C}(t) = \mathbf{A}\mathbf{C}(t) + \mathbf{b}. \quad (3.5)$$

Sendo assim, irá ser considerada a Equação (3.5) para os próximos cálculos do metamodelo baseado no RothC.

A Tabela 4 foi desenvolvida para a descrição dos símbolos utilizados nessa subseção.

Tabela 4 – Descrição dos parâmetros utilizados no desenvolvimento do metamodelo baseado no RothC

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
p_1	CP	0,67	adimensional
p_2	CP	0,78	adimensional
p_3	CP	0,46	adimensional
α	CP	$(1 - p_2)(1 - p_3)$	adimensional
θ	CP	$(1 - p_2)p_3$	adimensional
k_{DPM}	TD: DPM	10.rfm	ano ⁻¹
k_{RPM}	TD: RPM	0,3.rfm	ano ⁻¹
k_{BIO}	TD: BIO	0,66.rfm	ano ⁻¹
k_{HUM}	TD: HUM	0,02.rfm	ano ⁻¹

3.1.2 Century: equações diferenciais

Observando a Figura 3, considere as equações diferenciais do Century:

$$\begin{cases} \dot{C}_{EPA} = W\alpha_1 - C_{EPA} \cdot k_{EPA} \\ \dot{C}_{EPR} = W\alpha_2 - C_{EPR} \cdot k_{EPR} \\ \dot{C}_{MPA} = W\alpha_3 - C_{MPA} \cdot k_{MPA} \\ \dot{C}_{MPR} = W\alpha_4 - C_{MPR} \cdot k_{MPR} \\ \dot{C}_{MS} = \Theta_{EPA}^{MS} F_{EPA} + \Theta_{MPA}^{MS} F_{MPA} - C_{MS} \cdot k_{MS} \\ \dot{C}_{LEN} = \Theta_{EPA}^{LEN} F_{EPA} + \Theta_{MS}^{LEN} F_{MS} + \Theta_{EPR}^{LEN} F_{EPR} + \Theta_{AT}^{LEN} F_{AT} - C_{LEN} \cdot k_{LEN} \\ \dot{C}_{PAS} = \Theta_{LEN}^{PAS} F_{LEN} + \Theta_{AT}^{PAS} F_{AT} - C_{PAS} \cdot k_{PAS} \\ \dot{C}_{AT} = \Theta_{EPR}^{AT} F_{EPR} + \Theta_{MPR}^{AT} F_{MPR} + \Theta_{LEN}^{AT} F_{LEN} + \Theta_{PAS}^{AT} F_{PAS} - C_{AT} \cdot k_{AT} \end{cases}$$

Neste sistema W é o aporte de matéria orgânica pela morte de tecidos vegetais (produção primária líquida - material colhido), $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ são coeficientes de particionamento (CP) de W , Θ_i^j são os coeficientes de particionamento entre os estoques de carbono, F_i é o fluxo de saída de cada estoque, dado por $F_i = C_i k_i$, k_i é a taxa de decomposição (TD) de cada estoque e C_i é o carbono atual no estoque.

Estas equações podem ser sintetizadas numa forma vetorial da seguinte maneira:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} C_{EPA} \\ C_{EPR} \\ C_{MPA} \\ C_{MPR} \\ C_{MS} \\ C_{LEN} \\ C_{PAS} \\ C_{AT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W\alpha_1 \\ W\alpha_2 \\ W\alpha_3 \\ W\alpha_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Theta_{EPA}^{MS} & 0 & \Theta_{MPA}^{MS} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ \Theta_{EPA}^{LEN} & \Theta_{EPR}^{LEN} & 0 & 0 & \Theta_{MS}^{LEN} & -1 & 0 & \Theta_{AT}^{LEN} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Theta_{LEN}^{PAS} & -1 & \Theta_{AT}^{PAS} \\ 0 & \Theta_{EPR}^{AT} & 0 & \Theta_{MPR}^{AT} & 0 & \Theta_{LEN}^{AT} & \Theta_{PAS}^{AT} & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_{EPA} \\ C_{EPR} \\ C_{MPA} \\ C_{MPR} \\ C_{MS} \\ C_{LEN} \\ C_{PAS} \\ C_{AT} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} k_{EPA} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{EPR} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{MPA} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{MPR} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{MS} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{LEN} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{PAS} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{AT} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_{EPA} \\ C_{EPR} \\ C_{MPA} \\ C_{MPR} \\ C_{MS} \\ C_{LEN} \\ C_{PAS} \\ C_{AT} \end{bmatrix}$$

Considerando a matriz dos coeficientes de particionamento como Θ , a matriz de coeficientes de decomposição como \mathbf{K} e o vetor de entradas de carbono \mathbf{b} , obtém-se:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{C}(t) = \Theta\mathbf{K}\mathbf{C}(t) + \mathbf{b}, \quad (3.6)$$

assumindo $\mathbf{A} = \Theta\mathbf{K}$, a Equação (3.6) pode ser reescrita como:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{C}(t) = \mathbf{A}\mathbf{C}(t) + \mathbf{b}. \quad (3.7)$$

A Equação (3.7) será utilizada para as próximas deduções. Note que a Equação (3.5) e a Equação (3.7) são similares, portanto as deduções valem para ambos os metamodelos.

A Tabela 5 foi desenvolvida para a descrição dos símbolos utilizados nessa subseção.

Tabela 5 – Descrição dos parâmetros utilizados no desenvolvimento do metamodelo baseado no Century

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
SC	Fração de carbono superficial	-	-
F_M	Parte do resíduo da planta que vai para o estoque metabólico	Equação 2.19	-
T_C	Conteúdo de argila do solo	-	-
F_T	Carbono perdido por respiração microbiana	Equação 2.13	-
T_S	Conteúdo de areia do solo	-	-
H_2O_{30}	Água lixiviada mensalmente abaixo dos 30cm	-	-
α_1	CP: NPP para EPA	$SC(1 - F_M)$	adimensional
α_2	CP: NPP para EPR	$SC.F_M$	adimensional
α_3	CP: NPP para MPA	$(1 - SC)(1 - F_M)$	adimensional
α_4	CP: NPP para MPR	$(1 - SC)F_M$	adimensional
Θ_{EPA}^{MS}	CP: EPA para MS	$0.4F_{EPA}$	adimensional
Θ_{MPA}^{MS}	CP: MPA para MS	$0.4F_{MPA}$	adimensional
Θ_{EPA}^{LEN}	CP: EPA para LEN	$0.7F_{EPA}$	adimensional
Θ_{MS}^{LEN}	CP: MS para LEN	$0.4F_{MS}$	adimensional
Θ_{EPR}^{LEN}	CP: EPR para LEN	$0.7F_{EPR}$	adimensional
Θ_{AT}^{LEN}	CP: AT para LEN	$1 - \Theta_{LEN}^{PAS} - \Theta_{LIX}$	adimensional
Θ_{LEN}^{PAS}	CP: LEN para PAS	$0.003 - 0.009T_C$	adimensional
Θ_{AT}^{PAS}	CP: AT para PAS	$0.003 - 0.032T_C$	adimensional

Θ_{EPR}^{AT}	CP: EPR para AT	$0.45F_{EPR}$	adimensional
Θ_{MPR}^{AT}	CP: MPR para AT	$0.45F_{MPR}$	adimensional
Θ_{LEN}^{AT}	CP: LEN para AT	$1 - \Theta_{LEN}^{PAS} - 0.55$	adimensional
Θ_{PAS}^{AT}	CP: PAS para AT	$0.45F_{PAS}$	adimensional
Θ_{LIX}	Carbono lixiviado	$(H_2O_{30})(0.01 + 0.04T_C)$	adimensional
k_{EPA}	TD: EPA	3.9	ano^{-1}
k_{EPR}	TD: EPR	4.9	ano^{-1}
k_{MPA}	TD: MPA	14.8	ano^{-1}
k_{MPR}	TD: MPR	18.5	ano^{-1}
k_{MS}	TD: MS	6.0	ano^{-1}
k_{LEN}	TD: LEN	0.20	ano^{-1}
k_{PAS}	TD: PAS	0.0045	ano^{-1}
k_{AT}	TD: AT	7.3	ano^{-1}

3.1.3 Cálculo de C^*

A taxa de variação do estoque de carbono em um modelo é dada pela diferença entre o fluxo de entrada de carbono no estoque e o fluxo de saída. Considere o sistema linear da forma $\dot{\mathbf{C}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{C}(t) + \mathbf{b}$, que servem para ambos os metamodelos, como visto nas subseções anteriores.

O carbono de equilíbrio (C^*) é obtido ao supor que a diferença entre a taxa de entrada e saída dos estoques são nulas, sendo assim:

$$\mathbf{A}\mathbf{C}^* + \mathbf{b} = 0, \quad (3.8)$$

que resulta em:

$$\mathbf{C}^* = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}. \quad (3.9)$$

Portanto, o carbono de equilíbrio (C^*) para ambos os metamodelos é dado pela Equação (3.9).

3.1.4 Cálculo de $C(t)$

Considere, novamente, a equação $\dot{\mathbf{C}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{C}(t) + \mathbf{b}$. Aplicando uma mudança de variável da forma $\mathbf{C}(t) = \mathbf{X}(t) - \mathbf{s}$, obtém-se

$$(\dot{\mathbf{X}}(t) - \dot{\mathbf{s}}) = \mathbf{A}(\mathbf{X}(t) - \mathbf{s}) + \mathbf{b}, \quad (3.10)$$

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) - \mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{b}, \quad (3.11)$$

tomando $\mathbf{s} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$, tem-se

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) - \mathbf{A}(\mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}) + \mathbf{b}, \quad (3.12)$$

$$= \mathbf{A}\mathbf{X}(t). \quad (3.13)$$

A solução de $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X}(t)$ é dada por $\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}_0 e^{\mathbf{A}(t-t_0)}$. Lembrando que $\mathbf{X}_0 = \mathbf{C}_0 + \mathbf{s}$ e $\mathbf{s} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$, ao substituir essas variáveis em $\mathbf{C}(t)$ obtém-se

$$\mathbf{C}(t) = \mathbf{X}(t) - \mathbf{s} \quad (3.14)$$

$$= \mathbf{X}_0 e^{\mathbf{A}(t-t_0)} - \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}, \quad (3.15)$$

$$= (\mathbf{C}_0 + \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b})e^{\mathbf{A}(t-t_0)} - \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}. \quad (3.16)$$

Da subseção anterior, sabe-se que $\mathbf{C}^* = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$, portanto os estoques de carbono ($\mathbf{C}(t)$) pode ser calculado por

$$\mathbf{C}(t) = (\mathbf{C}_0 - \mathbf{C}^*)e^{\mathbf{A}(t-t_0)} + \mathbf{C}^* \quad (3.17)$$

3.1.5 Cálculo de $\rho(t)$

Agora que se tem as deduções de \mathbf{C}^* e de $\mathbf{C}(t)$, pode-se deduzir $\rho(t)$ da seguinte forma:

$$\rho(t) = \frac{\dot{C}(t)}{C^* - C(t)} \quad (3.18)$$

$$= \frac{(\sum_i C_i(t))'}{C^* - \sum_i C_i(t)} \quad (3.19)$$

$$= \frac{\sum_i C_i'(t)}{C^* - \sum_i C_i(t)} \quad (3.20)$$

$$= \frac{\sum_i (\mathbf{A}\vec{C}(t) + \mathbf{b})_i}{C^* - \sum_i C_i(t)} \quad (3.21)$$

$$= \frac{\sum_i \sum_j A_{ij} C_j(t) + \sum_i b_i}{-\sum_i \sum_j A_{ij}^{-1} b_j - \sum_i C_i(t)} \quad (3.22)$$

$$= \frac{\sum_j (\sum_i A_{ij}) C_j(t) + \sum_i b_i}{-\sum_j (\sum_i A_{ij}^{-1}) b_j - \sum_i C_i(t)} \quad (3.23)$$

A partir das deduções acima, a implementação dos metamodelos usando o software R é possível. A seção de resultados apresenta as comparações entre as simulações de carbono total dos modelos originais e os metamodelos.

3.2 Implementação, Dados e Análises

Os modelos originais RothC e Century foram implementados usando o software R para que fosse possível a comparação e avaliação com os metamodelos. A implementação do RothC foi feita utilizando o texto de Colemann e Jeckinson (2014), enquanto que o Century foi implementado utilizando o texto de Parton et al. (2001) e seu código original em linguagem de programação FORTRAN.

Os dados utilizados para as simulações são fictícios, sendo parte deles retirados dos documentos originais dos modelos e a outra parte preenchida pelos autores. Os dados mais importantes para as simulações das trajetórias de carbono exibidas neste trabalho encontram-se nas Tabelas 4 e 5. As simulações foram feitas por um período de 20 anos, tempo suficiente para o COS atingir o equilíbrio.

Para a análise das simulações foram gerados dois gráficos: o primeiro apresenta as trajetórias dos valores de carbono total do solo do metamodelo com seu respectivo modelo, permitindo a comparação entre esses valores. Já o segundo apresenta o erro relativo entre as simulações, calculado pela diferença entre o valor do modelo com o metamodelo dividido pelo valor do modelo, permitindo a visualização e avaliação dos erros.

4 Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no decorrer da pesquisa. São organizados duas seções, a primeira dedicada aos resultados obtidos para o metamodelo baseado no RothC e a segunda dedicada ao metamodelo baseado no Century.

4.1 RothC

A fim de analisar o desempenho do metamodelo baseado no RothC em relação ao modelo original, foram geradas as estimativas dos estoques de carbono total de ambos os modelos e comparadas em um mesmo gráfico, bem como a geração de um segundo gráfico ilustrando a trajetória dos erros absolutos durante a simulação (Figuras 5 e 6).

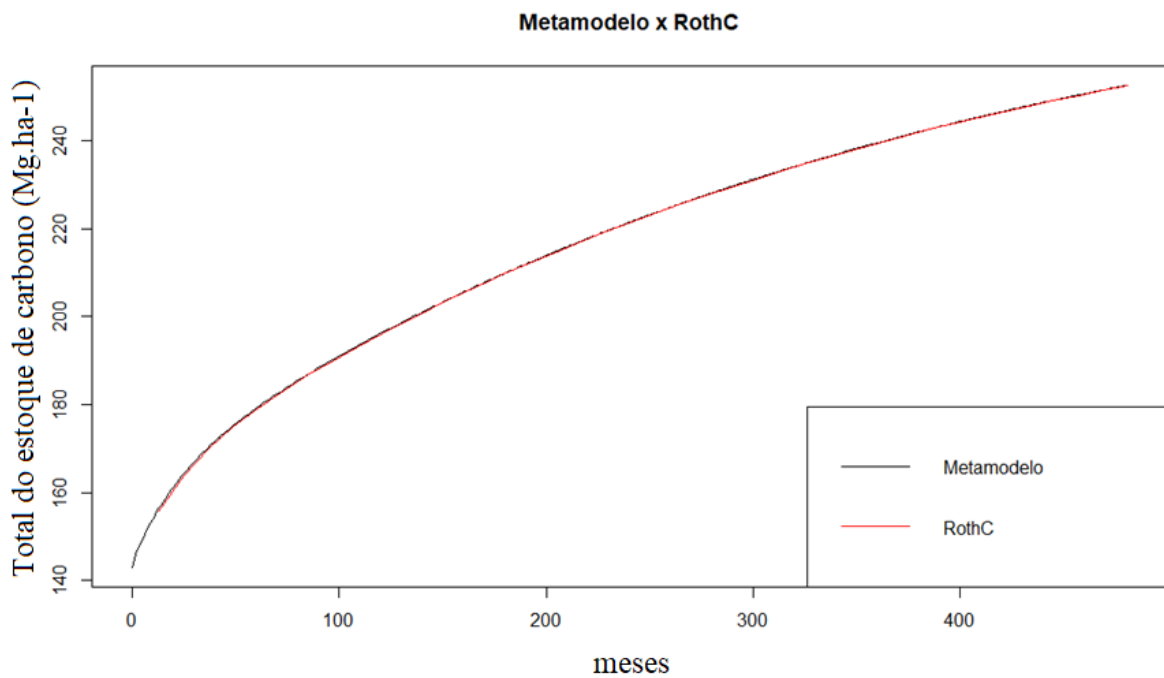


Figura 5 – Comparação das simulações de carbono total entre o metamodelo e o RothC

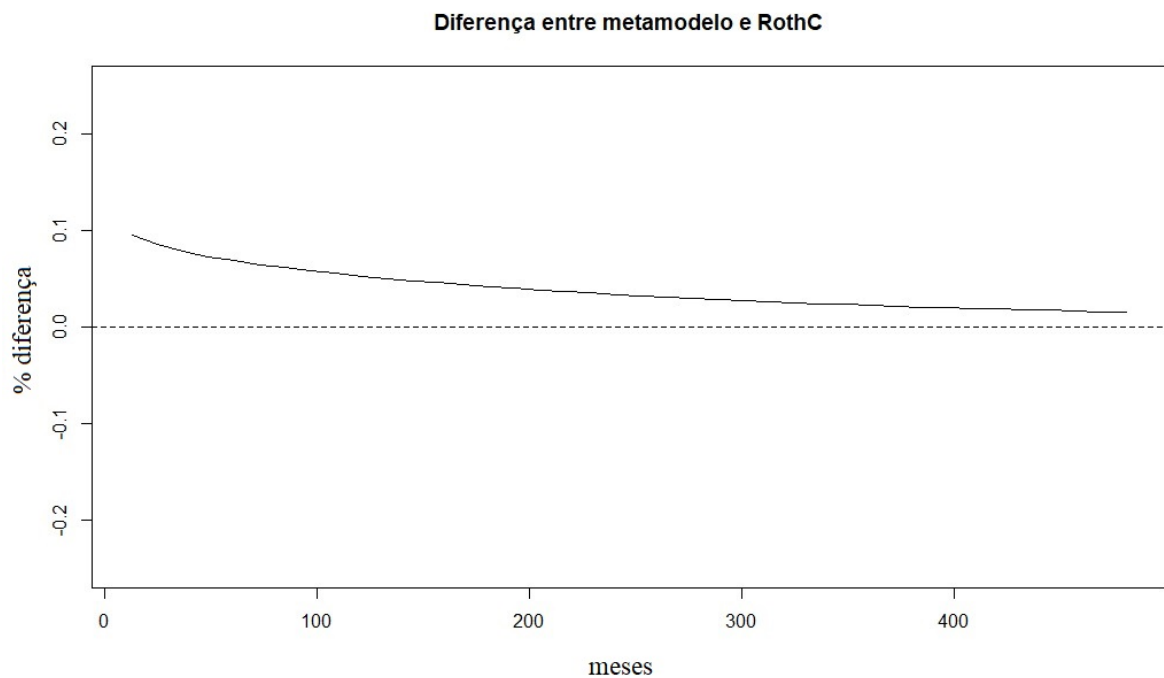


Figura 6 – Erros relativos obtidos ao comparar o metamodelo com o RothC

Ao analisar a Figura 5, verifica-se que as trajetórias de carbono total ao longo dos meses é similar entre o metamodelo e o modelo original. De fato, ao observar o gráfico de erros, nota-se que todos eles ficaram abaixo dos 0.1%. Portanto, este metamodelo condiz com as especificações em El-Beltagy, Nair, Keane (1999) e Dennis, Torczon (1997) das quais definem o metamodelo como uma aproximação de um modelo mais complexo, mas que conserva as relações das variáveis de entrada e saída do modelo.

O parâmetro $\rho(t)$ do metamodelo impacta diretamente as simulações de carbono geradas, sendo assim, é importante avaliar o seu comportamento. A Figura 7 ilustra a trajetória de $\rho(t)$ em relação ao tempo de simulação.

Nota-se que o valor atribuído a $\rho(t)$ diminui de acordo com o tempo, este fato é coerente com a realidade, pois os estoques tendem assintoticamente ao equilíbrio.

A adequação do metamodelo para uma situação de calibração foi analisada utilizando dados sintéticos gerados a partir de uma trajetória na qual os parâmetros C^* e $\rho(t)$ foram alterados em relação aos originais. A partir desses valores foi introduzido ruído gaussiano com média zero de coeficiente de variação de 8%. A Figura 8 apresenta a simulação nesta condição sem nenhum tipo de calibração, enquanto que a Figura 9 apresenta a simulação em que os parâmetros foram ajustados.

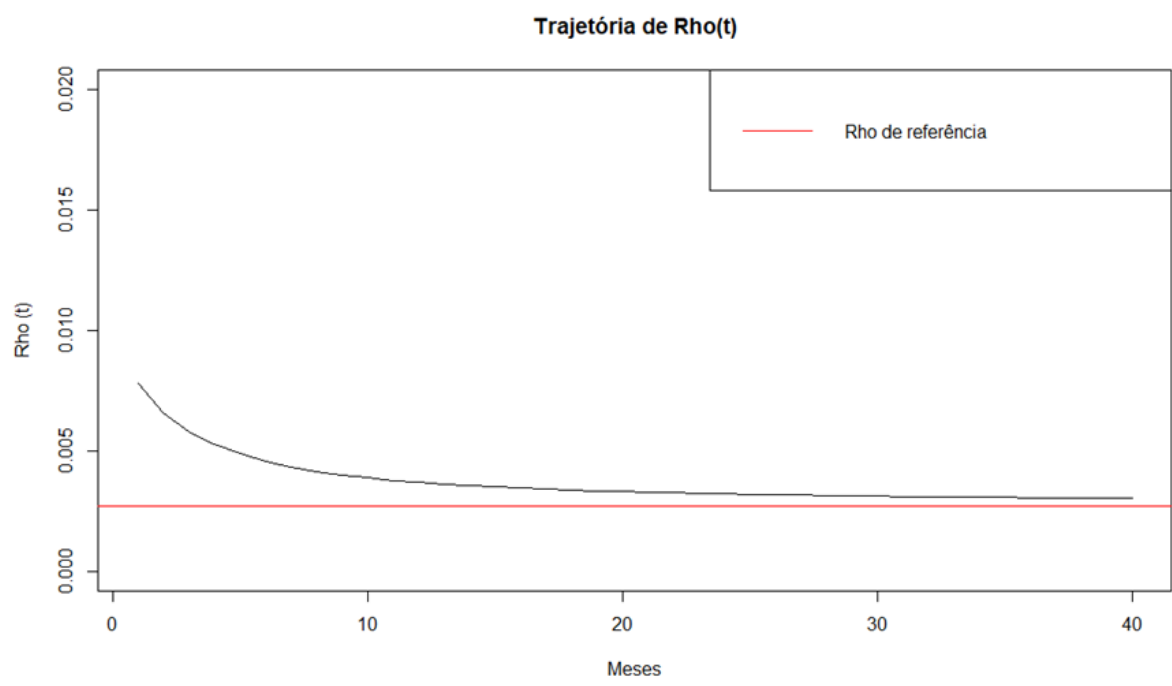


Figura 7 – Trajetória de $\rho(t)$ durante a simulação

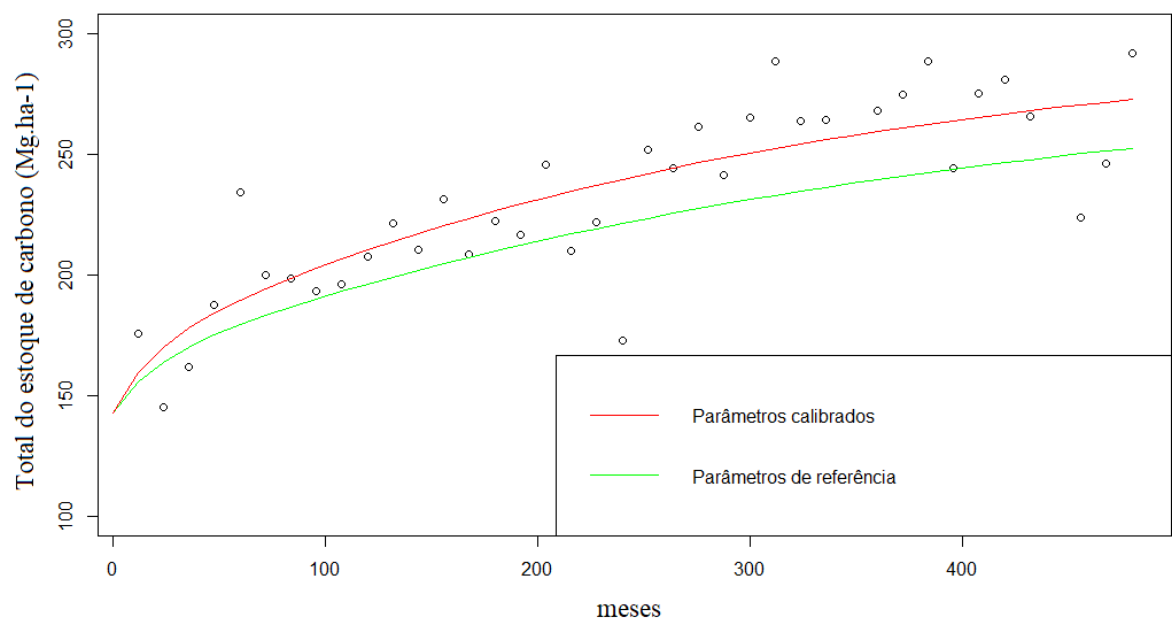


Figura 8 – Simulação geradas a partir de alterações em C^* e $\rho(t)$ e atribuição de ruídos

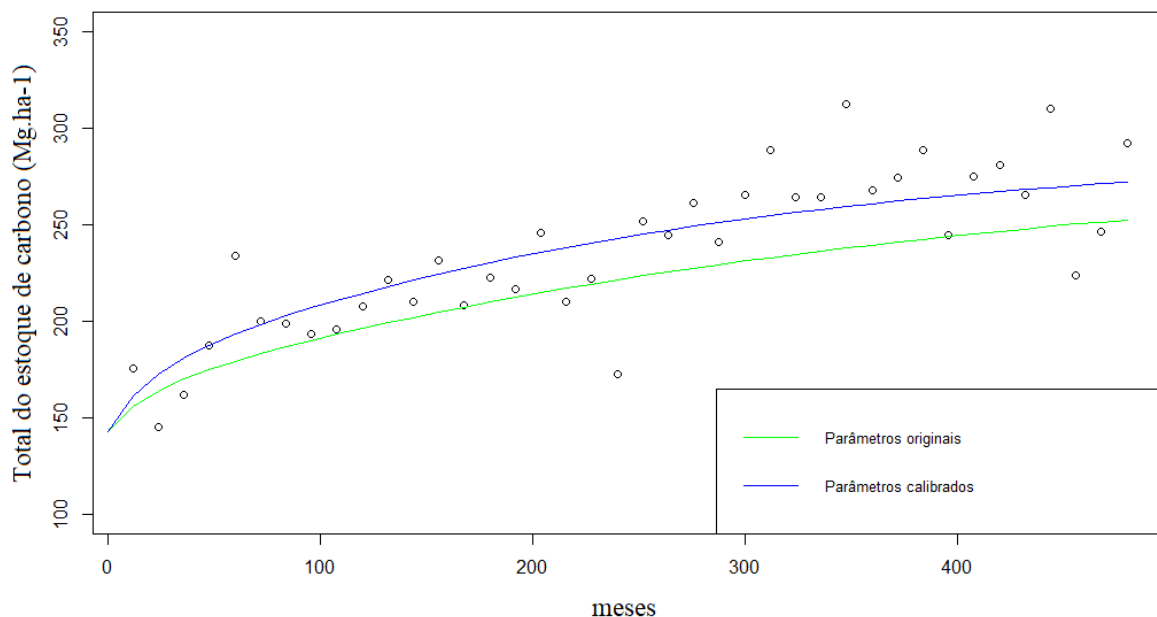


Figura 9 – Simulação geradas após a calibração dos parâmetros C^* e $\rho(t)$ e atribuição de ruídos

4.2 Century

Esta seção apresenta os resultados obtidos com a implementação do metamodelo baseado no Century. A Figura 10 apresenta a comparação das trajetórias de carbono total geradas pelo metamodelo e o modelo original, enquanto que a Figura 11 apresenta o gráfico com erros relativos obtidos durante a simulação.

Ao analisar a Figura 11 observa-se que os erros relativos obtidos na comparação dos modelos é inferior a 0.05%, assim como possuem trajetórias de carbono total similares ao longo da simulação.

O metamodelo baseado no Century também cumpre com o objetivo, sendo uma boa aproximação para as simulações realizadas (El-Beltagy, Nair, Keane, 1999; Dennis, Torczon 1997).

Ainda, no Century, realizar uma análise de sensibilidade seria mais caro computacionalmente do que o RothC, pois seria necessário realizar combinações entre as oito taxas de decomposição dos estoques com a taxa de carbono total. No metamodelo baseado no Century os parâmetros seriam reduzidos a dois, $\rho(t)$ e C^* , reduzindo o gasto computacional com a análise (Saltelli, 2002; Frey, Patil, 2002).

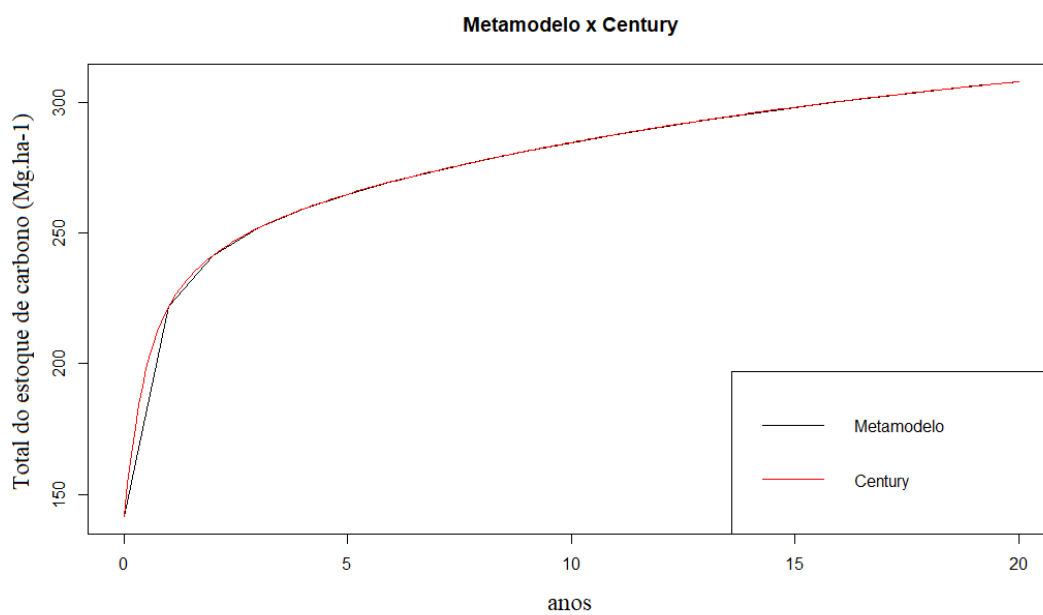


Figura 10 – Comparação das simulações de carbono total entre o metamodelo e o Century

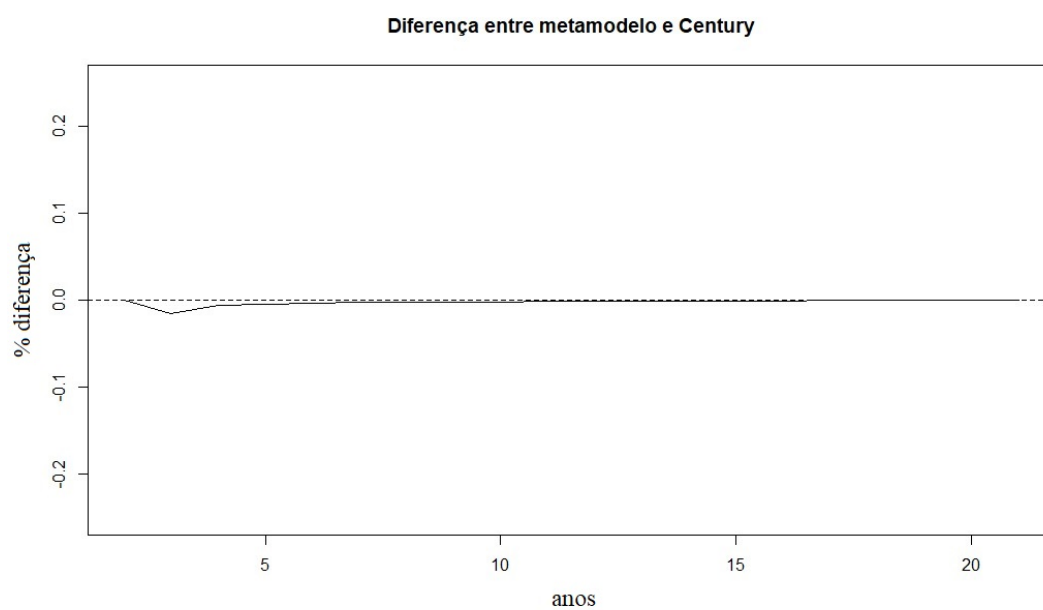


Figura 11 – Erros relativos obtidos ao comparar o metamodelo com o Century

5 Considerações Finais

A realização do trabalho permitiu confirmar que o desenvolvimento de metamodelos de dinâmica de carbono no solo por meio da equação de um único estoque permite gerar resultados compatíveis com os modelos originais permitindo que a taxa de decomposição desse estoque seja variável no tempo. Além disso, comparando com os modelos originais e as simulações propostas neste trabalho, os erros obtidos nas simulações são insignificantes para aplicação a campo, o que garante que, a partir do conhecimento das trajetórias temporais da taxa média de decomposição de carbono do solo, é possível se obter uma boa performance dos metamodelos e viabilizar seu uso para a simulação de carbono total com possíveis vantagens estatísticas tanto para procedimentos de calibração quanto para procedimentos de assimilação de dados. Essas vantagens ainda precisam ser confirmadas em trabalhos futuros.

Esse trabalho contribui para as pesquisas de carbono orgânico do solo por apresentar duas ferramentas viáveis para o monitoramento dos estoques de carbono, sendo mais baratos computacionalmente e estatisticamente mais adequados para os processos de calibração e assimilação de dados do que os modelos originais.

As deduções matemáticas feitas nesse trabalho podem ser úteis para pesquisas futuras e podem ser empregadas em outros modelos multicompartimentais da dinâmica de carbono no solo. Dado que no solo as formas químicas e as associações físicas de compostos de carbono são inúmeras, consideramos que a definição arbitrária de compartimentos, como é feito nos modelos originais é uma desvantagem em relação ao metamodelo para os que buscam a avaliação apenas quantitativa das taxas de carbono do solo, pois dificultam sua inicialização, calibração e assimilação de dados. Nesse contexto, pode-se considerar a modelagem das taxas médias de degradação como uma abordagem mais útil e efetiva do que o uso de taxas fixas para cada compartimento.

Ainda, outra vantagem dos metamodelos é que eles possuem menos parâmetros que os modelos originais, no caso dos metamodelos desenvolvidos nesta pesquisa, os parâmetros utilizados são dados por C^* e $\rho(t)$. Os metamodelos podem ser melhores opções para conjuntos de campo, particularmente considerando que C^* é o carbono de equilíbrio do solo, o qual é muito mais intuitivo e com valores de referência passíveis de serem determinados em áreas com mesmo uso por longo prazo. Assim é de se esperar que possam ser mais efetivamente calibrados em situação nas quais dados sejam escassos.

Entretanto, os metamodelos que foram desenvolvidos nesta pesquisa apresentam a desvantagem de serem dependentes das taxas de decomposição e coeficientes de particionamento dos modelos originais, tornando necessário a resolução dos modelos para

depois fazer as simulações com os metamodelos.

Sugere-se que trabalhos futuros incluam a avaliação da acurácia dos metamodelos (Tedeschi, 2006) para dados de experimentos de longa duração em diversas regiões. Recomenda-se ainda que o desempenho estatístico dos metamodelos na estimação de estoques de carbono (estado) e na projeção a partir de técnicas de assimilação de dados sejam avaliados em relação aos modelos originais.

Referências

- BAKER, S. et al. Survey of Risk Management in Major UK Companies. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, v. 125, n. 3, p. 94–102, 1999.
- BARIONI, L. G. et al. Modelagem matemática do balanço de gases do efeito estufa na pecuária de corte. **Revista Brasileira De Zootecnia**, v. 40, p. 201–212, 2011.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, p. 9-26, 1999.
- BOT, A., BENITES, J. The importance of soil organic matter: key to drought-resistant soil and sustained food and production. Roma: FAO, 2005.
- BRILLI, L. et al. Review and analysis of strengths and weaknesses of agro-ecosystem models for simulating C and N fluxes. **Science of the Total Environment**, v. 598, p. 445-470, 2017.
- CAMPBELL, E. E., FIELD, J. L., PAUSTIAN, K. Modelling soil organic matter dynamics as a soil health indicator. **In Managing soil health for sustainable agriculture**, v. 2, p. 27, 2018.
- CERRI, C. E. P. et al. Simulating COS changes in 11 land use change chronosequences from the Brazilian Amazon with RothC and CENTURY models. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 122, p. 46–57, 2007.
- COLEMAN, K., JENKINSON, D. S.: ROTHC-26.3: A model for the turnover of carbon in soil, Model description and windows users guide, IACR, Rothamsted, Harpenden, 2014.
- CONANT, R. T., SMITH, G. R., PAUSTIAN, K. Spatial variability of soil carbon in forested and cultivated sites: implications for change detection. **Journal of Environmental Quality**, v. 32, p. 278–286, 2003.
- CULLEN, A. C., FREY, H. C. Probabilistic Techniques in Exposure Assessment. Nova York: Plenum Press, 1999.
- DENNIS, J. E. TORCZON, V. Managing approximation models in optimization, In: ALEXANDROV, N. M. HUSSAINI, M. Y. **Multidisciplinary Design Optimization: State of the Art**. Filadélfia: SIAM, 1997, p. 330–347.
- EL-BELTAGY, M. NAIR, P. KEANE, A. Metamodeling techniques for evolutionary optimization of computationally expensive problems: Promise and limits. **Proceedings**

- of **Genetic and Evolutionary Computation Conference**, p. 196–203, 1999.
- EMERSON, M. SZTIPANOVITS, J. Techniques for Metamodel Composition. **OOPSLA–6th Workshop on Domain Specific Modeling**, p. 123–139, 2006.
- FANG, K. LI, R. SUDJIANTO, A. Design and modeling for computer experiments. 1^a edição, Chapman & Hall/CRC, 2005.
- CLARA, F et al. Soil Organic Carbon: The Hidden Potential. Roma: FAO, 2017.
- FORRESTER, J.W., 1961. Industrial Dynamics. MIT Press, Cambridge.
- FRANKO, U. et al. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the CANDY model. **Geoderma**, v. 81, p. 109-120.
- FREY, H. C., PATIL, S. R. Identification and review of sensitivity analysis methods. **Risk Analysis**, v. 22, n. 3, p. 553–578, 2002.
- HANSEN, S. et al. Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model DAISY. **Fertilizer Research**, v. 27, p. 245-259.
- JONES, R. N. Analyzing the Risk of Climate Change Using an Irrigation Demand Model. **Climate Research**, v. 14, n. 2, p. 89–100, 2000.
- KWON, H. Y., HUDSON, R. J. M. Quantifying management-driven changes in organic matter turnover in an agricultural soil: An inverse modeling approach using historical data and a surrogate CENTURY-type model. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 2241–2253, 2010.
- LEITE, L. F. C., MENDONÇA, E. S. Modelo CENTURY de dinâmica da matéria orgânica do solo: Equações e pressupostos. **Ciência Rural**, v. 4, p. 679–686, 2003.
- LI, C., FROLKING, S., FROLKING, T.A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: Model structure and sensitivity. **Geophysical Research**, v. 97, p. 9759-9776.
- MELLO, F. F. C. et al. Payback time for soil carbon and sugar-cane ethanol. **Nature Climate Change**, v. 4(7), p. 605–609, 2014.
- MOLINA, J. A. E. et al. NCSOIL, a model of nitrogen and carbon transformations in soil: description, calibration, and behavior. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, p. 85-91, 1983.
- MORENO, R. et al. Application of artificial neural networks to estimate soil organic carbon in a high-organic-matter Mollison. **Spanish Journal of Soil Science**, v. 7(3), pp. 179–200. 2017.

- MOZZER, G. B. Agriculture and Cattle Raising in the Context of a Low Carbon Economy. In **Climate Change in Brazil: Economic, social and Regulatory Aspects**, p 107–121, 2011.
- ONDRASEK, G. et al. Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications. **Science of the Total Environment**, v. 658, pp. 1559–1573, 2018.
- PARTON, B. et al. CENTURY tutorial. Colorado State. 2001.
- PIANOSI, F. et al. Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. **Environmental Modelling and Software**, v. 79, p. 214–232, 2016.
- ROSCOE, R., BODDEY, R. M., SALTON, J. C. Sistemas de Manejo e Matéria Orgânica do Solo. IN: ROSCOE, R. MERCANTE, F. M., SALTON, J. C, Embrapa Agrobiologia. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares**. Dourados, p. 17-42, 2006.
- SALTELLI, A. Sensitivity analysis for importance assessment. **Risk Analysis**, v. 22, n. 3, p. 579–590, 2002.
- SALTON, J. C. et al. Matéria Orgânica do Solo na Integração Lavoura-Pecuária em Mato Grosso do Sul. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, Dourados-MS, 2005.
- SCHAEFFER, D. L. A model evaluation methodology applicable to environmental assessment models. **Ecological Modelling**, v. 8, p. 275–295, 1980.
- SCHARNAGL, B. et al. Information content of incubation experiments for inverse estimation of pools in the Rothamsted carbon model: A Bayesian perspective. **Biogeosciences**, p. 763–776, 2010.
- SKJEMSTAD, J. O. A. et al. Calibration of the Rothamsted organic carbon turnover model (RothC ver. 26.3), using measurable soil organic carbon pools. **Australian Journal of Soil Research**, v. 42, p. 79–88, 2004.
- SMITH, P. Land use change and soil organic carbon dynamics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 81, p. 169–178, 2007.
- STANFORD, G., SMITH, S. J. Nitrogen Mineralization Potentials of Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 36, p. 465–472, 1972.
- STOCKMANN, U. et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 164, p. 80-90, 2013.

TEDESCHI, L. O. Assessment of the adequacy of mathematical models. **Agricultural Systems**, v. 89, n. 2-3, p. 225–247, 2006.