

LINIKER FERNANDES DA SILVA

**MODELAGEM DA DINÂMICA DE FLORESTAS INEQUIÂNEAS: UMA  
APLICAÇÃO DA DINÂMICA DE SISTEMAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S586m  
2016  
Silva, Líniker Fernandes da, 1987-  
Modelagem da dinâmica de florestas inequiâneas : uma  
aplicação da dinâmica de sistemas / Líniker Fernandes da Silva.  
– Viçosa, MG, 2016.  
viii, 67f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Marcio Lopes da Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Florestas - Administração. 2. Mata Atlântica .  
3. Sequestro de Carbono. 4. Equações diferenciais.  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Florestal. Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal.  
II. Título.

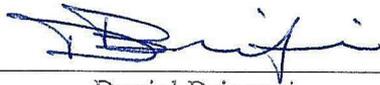
CDD 22. ed. 634.961

LINIKER FERNANDES DA SILVA

MODELAGEM DA DINÂMICA DE FLORESTAS INEQUIÂNEAS: UMA  
APLICAÇÃO DA DINÂMICA DE SISTEMAS

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 01 de julho de 2016.



Daniel Brianezi



Pedro Christo Brandão



Carlos Moreira Miquelino Elete Torres  
(Coorientador)



Hélio Garcia Leite



Marcio Lopes da Silva  
(Orientador)

*À Deus,  
À Família,  
Aos Amigos.*  
DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, pelas maravilhosas oportunidades que tenho tido e pela força que venho recebendo ao longo da vida.

Aos meus pais, pelos ensinamentos, criação, carinho e educação que me deram.

Aos meus diversos familiares que, que sempre me ajudaram e me fizeram acreditar no mundo e em mim mesmo.

À minha noiva, pelo amor e incentivo ao longo desta jornada.

Ao professor Marcio Lopes da Silva, pela oportunidade do doutorado, pelos ensinamentos, conselhos e convivência no doutorado.

Ao professor Carlos Moreira Miquelino Eieto Torres pela confiança, apoio ao trabalho, e pela amizade.

Ao professor Hélio Garcia Leite pela boa vontade em sempre ajudar e, sobretudo, pela amizade.

Ao Daniel Brianezi e ao Pedro Christo Brandão pela boa vontade em participar da banca.

Ao professor Roberto Max Protil pelas discussões e ensinamentos a respeito da Dinâmica de Sistemas.

Aos amigos, pelas ideias, discussões e apoio dados durante o doutorado.

Ao Departamento de Engenharia Florestal e a Universidade Federal de Viçosa, pela ótima formação.

A CAPES, pelo financiamento ao trabalho.

## **BIOGRAFIA**

Liniker Fernandes da Silva, nasceu em 26 de maio de 1987 no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, onde viveu por 17 anos.

Em maio de 2006 ingressou no curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, onde colou grau em julho de 2010.

Trabalhou na Sociedade de Investigações Florestais como Assistente Técnico Florestal, entre setembro de 2010 e junho de 2012.

Em novembro de 2012 ingressou no Programa de Mestrado em Ciência Florestal na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da dissertação em julho de 2014.

Em de 2014 ingressou no Programa de Doutorado em Ciência Florestal na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da tese em 01 de julho de 2016.

## SUMÁRIO

|                                                                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| RESUMO .....                                                                                                      | vii       |
| ABSTRACT .....                                                                                                    | viii      |
| INTRODUÇÃO GERAL .....                                                                                            | 1         |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                                                                   | 4         |
| <br>                                                                                                              |           |
| <b>CAPÍTULO I.....</b>                                                                                            | <b>7</b>  |
| Relações causais na dinâmica da distribuição diamétrica de uma Floresta Estacional Semidecidual .....             | 7         |
| RESUMO .....                                                                                                      | 7         |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                                                               | 7         |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS .....                                                                                       | 9         |
| 2.1. Dinâmica de Sistemas .....                                                                                   | 9         |
| 2.2. Características gerais do modelo proposto.....                                                               | 10        |
| 3. RESULTADOS.....                                                                                                | 10        |
| 3.1. Modelo proposto .....                                                                                        | 10        |
| 3.1.1. Ingresso .....                                                                                             | 10        |
| 3.1.2. Crescimento e taxas de mudança entre classes .....                                                         | 12        |
| 3.1.3. Mortalidade .....                                                                                          | 13        |
| 3.2. Relações causais nas variáveis de estoque do modelo proposto .....                                           | 14        |
| 4. DISCUSSÃO .....                                                                                                | 20        |
| 5. CONCLUSÕES .....                                                                                               | 21        |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                                                  | 22        |
| <br>                                                                                                              |           |
| <b>CAPÍTULO II .....</b>                                                                                          | <b>28</b> |
| Projeção da distribuição diamétrica de uma Floresta Estacional Semidecidual utilizando Dinâmica de Sistemas ..... | 28        |
| RESUMO .....                                                                                                      | 28        |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                                                               | 28        |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS .....                                                                                       | 29        |
| 2.1. Área de estudo.....                                                                                          | 29        |
| 2.2. Dados .....                                                                                                  | 30        |
| 2.3. Modelo dinâmico .....                                                                                        | 30        |
| 2.4. Calibração do modelo .....                                                                                   | 34        |
| 2.5. Avaliação da calibração do modelo .....                                                                      | 34        |

|                                                                                                                                     |                                                       |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------|
| 2.5.1.                                                                                                                              | Distribuição de área basal por classe diamétrica..... | 34        |
| 2.5.2.                                                                                                                              | Ingresso e mortalidade .....                          | 34        |
| 2.6.                                                                                                                                | Validação do modelo.....                              | 34        |
| 3.                                                                                                                                  | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                          | 35        |
| 3.1.                                                                                                                                | Avaliação do modelo calibrado.....                    | 35        |
| 3.1.1.                                                                                                                              | Área basal por classe diamétrica .....                | 35        |
| 3.1.2.                                                                                                                              | Ingresso e mortalidade .....                          | 37        |
| 3.2.                                                                                                                                | Validação.....                                        | 39        |
| 4.                                                                                                                                  | CONCLUSÕES .....                                      | 41        |
|                                                                                                                                     | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                      | 42        |
|                                                                                                                                     | ANEXO I.....                                          | 45        |
| <b>CAPITULO III.....</b>                                                                                                            |                                                       | <b>47</b> |
| Dinâmica do estoque de biomassa e carbono total em uma Floresta Estacional Semidecidual: uma aplicação da Dinâmica de Sistemas..... |                                                       | <b>47</b> |
|                                                                                                                                     | RESUMO .....                                          | 47        |
| 1.                                                                                                                                  | INTRODUÇÃO .....                                      | 47        |
| 2.                                                                                                                                  | MATERIAL E MÉTODOS .....                              | 49        |
| 2.1.                                                                                                                                | Dados .....                                           | 49        |
| 2.2.                                                                                                                                | Dinâmica de sistemas.....                             | 50        |
| 2.3.                                                                                                                                | Avaliação do modelo.....                              | 55        |
| 3.                                                                                                                                  | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                          | 55        |
| 4.                                                                                                                                  | CONCLUSÕES .....                                      | 58        |
|                                                                                                                                     | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                      | 59        |
|                                                                                                                                     | ANEXO I.....                                          | 65        |
| <b>CONCLUSÕES GERAIS .....</b>                                                                                                      |                                                       | <b>67</b> |

## RESUMO

SILVA, Liniker Fernandes da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2016. **Modelagem da dinâmica de florestas inequiâneas: uma aplicação da dinâmica de sistemas.** Orientador: Marcio Lopes da Silva. Coorientador: Carlos Moreira Miquelino Eleto Torres.

Este estudo teve por objetivo propor um modelo para explicar a dinâmica de uma floresta inequiânea, utilizando a abordagem de dinâmica de sistemas, bem como atestar sua aplicabilidade na modelagem da distribuição por classes de diâmetro. Para isso, representou-se as relações causais existentes entre os processos dinâmicos, responsáveis pelas mudanças na estrutura florestal, e a própria estrutura da floresta. Para calibragem do modelo, utilizou-se dados provenientes de dez parcelas permanentes instaladas em fragmento florestal no município de Viçosa, medidas nos anos de 1994, 1997, 2000, 2004 e 2008. Para validar o modelo, utilizou-se os dados do ano de 2012. O trabalho foi dividido em três capítulos, em que no capítulo I foi feito o diagrama de fluxo representando as relações causais entre os processos dinâmicos que regem as mudanças da floresta e sua estrutura. No capítulo II foi feita a calibragem e a validação do modelo proposto. Na avaliação do modelo, verificou-se: a estrutura diamétrica projetada, por meio de testes de aderência; o ingresso e a mortalidade, por meio do coeficiente de correlação e da média das diferenças absolutas. No capítulo III foi avaliada a aplicabilidade do modelo proposto para estudar a dinâmica da biomassa e carbono total, sendo que a avaliação do modelo foi realizada utilizando o coeficiente de correlação e a média das diferenças absolutas. Após as análises, verificou-se que o modelo proposto pode ser utilizado para estudar a dinâmica florestal, no que concerne a distribuição da área basal por classe de diâmetro, ingresso e mortalidade, além da dinâmica da biomassa e carbono. O modelo conseguiu captar com precisão a dinâmica existente nas classes diamétricas menores, algo que muitos métodos, como a cadeia de markov, não conseguem fazer com a mesma sensibilidade, em função da alta dinâmica existente nestas classes. Os resultados confirmaram o potencial de utilização da dinâmica de sistemas para modelar a dinâmica florestal, sendo que o modelo proposto pode ter usado na decisão sobre prescrições silviculturais e na formulação de projetos de neutralização de carbono, dentre outras aplicações.

## ABSTRACT

SILVA, Liniker Fernandes da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2016.

**Modeling the dynamics in uneven-aged forest: an application of system dynamics.**

Adviser: Marcio Lopes da Silva. Co-adviser: Carlos Moreira Miquelino Eleto Torres.

This study aims to propose a model that explains the dynamics in uneven-aged forest, using system dynamics approach, as well as verify its applicability on diametric distribution modeling. For this, I represented the causal relations between dynamics processes, that cause changes on forest structure, and the forest itself. To calibrate the model, I used data from 10 permanent plots installed on a forest fragment in Viçosa, that were measured in 1994, 1997, 2000, 2004 and 2008. The data measured in 2012 was used to validate the model. The work was divided in three chapters, in chapter I was done a flux diagram representing the causal relations between dynamics processes, that changes the forest, and the forest itself. In Chapter II was done a calibration and validation of the proposed model. On its evaluation were verified: the projected diametric distribution, by the adherence tests; the ingrowth and mortality, by Correlation Coefficient and Mean of Absolute Differences. In chapter III was evaluated the possibility to use the proposed model to study the dynamics of biomass and carbon, by Correlation Coefficient and Mean of Absolute Differences. After all analyses, I verified that the proposed model can be used to study the forest dynamics, regarding the distribution of basal area per diameter class, ingrowth and mortality, and the dynamic of biomass and carbon. I observed that the model can accurately capture the dynamics in the smaller diameter classes, what some methods, like Markov chain, can't do with the same sensibility in function of the high dynamics existent on those classes. The results confirm the potential of system dynamics applicability to model the forest dynamics, and the proposed model can be used on decisions about silvicultural prescriptions and formulation of carbon neutralization projects, among other applications.

## INTRODUÇÃO GERAL

A Mata Atlântica é reconhecida como um patrimônio nacional (BRASIL, 1988). Mesmo composta, em sua maioria, por pequenos fragmentos (ANUÁRIO MATA ATLÂNTICA, 2012) e apresentando apenas a 4º maior área entre os biomas, a Mata Atlântica é o 2º em estoque de madeira e o 3º em biomassa (BRASIL, 2013). Além disso, o referido bioma é um hotspot, áreas com alto grau de endemismo e intensamente perturbadas, (LAGOS; MULLER, 2007), o que exige cuidados ainda maiores para sua conservação.

A lei da Mata Atlântica prevê a proteção e uso do referido bioma em condições que assegurem a manutenção da biodiversidade e regime hídrico (BRASIL, 2006). Neste contexto, o manejo florestal é uma alternativa para alcançar os objetivos acima citados. Entretanto, para que o manejo seja sustentável (econômica, social e ambiental) é necessário o conhecimento sobre a dinâmica florestal (SILVA et al., 2015). Para isso, pode-se fazer uso dos modelos de crescimento e produção florestal.

Dentre os modelos de crescimento e produção, existem modelos em nível de povoamento (MNP), de árvores individuais (MAI) e de distribuição diamétrica (MDD). Os MDD, por informar o número de árvores por classe de tamanho, tem sido utilizados no manejo de florestas inequidêneas. Nesta atividade é necessário saber o volume de madeira de determinada área e o tamanho das peças de madeira que podem ser extraídas.

No Brasil, um dos métodos de predição do crescimento mais estudados tem sido a Cadeia de Markov. O mesmo se utiliza de uma matriz estacionária para prever a estrutura diamétrica futura (SOUZA; SOARES, 2013). Este fato pode causar alguns problemas na predição do crescimento (BARDEN, 1980; BINKLEY, 1980; AUSTREGÉSILO et al., 2004; DALLA LANA et al., 2015). Assim, é importante estudar novos métodos de predição do crescimento e produção em florestas inequidêneas.

Em uma comunidade florestal, existe um conjunto de variáveis de maior ou menor grau de inter-relação (SOUZA; SOARES, 2013). Existem diversas espécies, sendo classificadas desde comuns (muito abundantes na área) até raras (com baixa densidade de indivíduos). O relacionamento intraespecífico e interespecífico é diverso, sendo que este relacionamento influencia no padrão de distribuição espacial das árvores na floresta.

Segundo Lamprecht (1964), as florestas inequidâneas podem apresentar diversos estratos verticais, desde o sub-bosque até o estrato superior. A composição florística de cada estrato está intimamente ligada às preferências e necessidades de cada espécie, além das relações competitivas entre as árvores, as restrições ambientais e das perturbações, sejam elas naturais ou antrópicas (LATHAM et al., 1998).

O estoque volumétrico de uma floresta natural não é fixo, sendo que ao longo do tempo o mesmo apresenta uma curva de crescimento de tendência sigmoideal (SOUZA; SOARES, 2013). O crescimento da floresta é resultado de complexas interações de forças relativas ao metabolismo, fotossíntese, absorção de nutrientes e potencial biológico de cada indivíduo, sendo que estas características mudam de espécie para espécie. Além disso, forças catabólicas como a competição entre plantas, respiração, estresses, limitação dos recursos naturais e outros também influenciam diretamente no crescimento da floresta (SOUZA; SOARES, 2013). Desta forma, para se modelar o crescimento e a dinâmica florestal é importante ter um método capaz de descrever todo este complexo sistema de variáveis intrínsecas ao processo em questão.

Neste contexto tem-se a Dinâmica de Sistemas, como uma linguagem capaz de demonstrar, de forma mais clara e organizada, as relações presentes em sistemas altamente complexos baseados em feedbacks (KYUNG; MOOSUNG, 2005). A mesma aplica conceitos da engenharia como os servomecanismos (RICHARDSON, 1991) de forma a traduzir a mútua interferência entre os elementos. Por meio dos diagramas causais ou de fluxo e estoque, expressa-se graficamente as relações causais existentes em determinado evento da natureza.

Em função destas características, a Dinâmica de Sistemas é uma abordagem capaz de modelar a dinâmica florestal (MESSIER; PUETTMANN, 2011), já tendo sido aplicada para florestas plantadas (LONCAR et al., 2006; MACHADO et al., 2015), e para sistemas agroflorestais (TRENATH, 1989; VAN NOORDWIJK, 1999; VAN NOORDWIJK et al., 2001).

Desta forma, sabendo-se da carência de métodos capazes de modelar a dinâmica florestal, desenvolveu-se estudos para: propor um modelo elucidando as relações causais envolvidas na dinâmica florestal, parametrizar um modelo dinâmico capaz de prever a estrutura da área basal por classe de diâmetros em uma floresta e propor a aplicação do

modelo desenvolvido na predição do estoque de biomassa e carbono. Para tanto, este estudo foi estruturado em 3 capítulos, sendo eles:

- Relações causais na dinâmica da distribuição diamétrica de uma Floresta Estacional Semidecidual;
- Projeção da distribuição diamétrica de uma Floresta Estacional Semidecidual utilizando Dinâmica de Sistemas;
- Dinâmica do estoque de biomassa e carbono total em uma Floresta Estacional Semidecidual: uma aplicação da Dinâmica de Sistemas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANUÁRIO MATA ATLÂNTICA 2012. **Avanços, oportunidades e desafios**. Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica. São Paulo, 2012.

AUSTREGÉSILO, S.L.; FERREIRA, R.L.C.; SILVA, J.A.A.; SOUZA, A.L.; MEUNIER, I.M.J.; SANTOS, E.S. Comparação de métodos de prognose da estrutura diamétrica de uma floresta estacional semidecidual secundária. **Revista Árvore**, v. 28, n. 2, p. 227-232, 2004.

BARDEN, L.S. Tree replacements in a cove hardwood forest of the Southern Appalachians, in: **OIKOS**, vol. 35, p.16-19, 1980.

BINKLEY, C.S. Is succession in hardwood forests a stationary Markov process?, in: **Forest Sci.**, vol.26, p. 566-570, 1980.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988. 292 p.

BRASIL. Lei nº 11428 de 22 de dezembro de 2006. Dispões sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. Diário oficial da união de 26 de dez de 2006, 2006.

BRASIL. Serviço Florestal Brasileiro. Florestas do Brasil em resumo 2013. Disponível em: < <http://www.florestal.gov.br/publicacoes/tecnico-cientifico/florestasdo-brasil-em-resumo-2013>>. Acesso em 18 de abr de 2015.

DALLA LANA, M.; PÉLLICO NETTO, S.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETA, C. R.; EBLING, A. A. Prognose da Estrutura Diamétrica em Floresta Ombrófila Mista. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 1, p. 71-78, 2015.

LAGOS, A. R.; MULLER, B. L. A. Hotspot Brasileiro. **Saúde & Ambiente em Revista**, v. 2, n. 2, p. 35-45, 2007.

LAMPRECHT, D. R. **Silvicultura nos trópicos**. Eschborn: GTZ, 1990. 343 p.

LONCAR, L.; HELL, M.; DUSAK, V. A System Dynamics Model of Forest Management. In 28<sup>th</sup> International Conference Information Technology Interfaces ITI 2006, Cavtat, Croatia.

LATHAM, P. A.; ZUURING, H. R.; COBLE, D. W. A method for quantifying vertical forest structure. **Forest Ecology and Management**, v. 104, n. 1, p. 157-170, 1998.

KYUNG, M. K.; MOOSUNG, J. A quantitative assessment of LCOs for operations using system dynamics. **Reliab. Engi. Syst.**, v. 87, p. 211-222, 2005.

MACHADO, R.R.; CONCEIÇÃO, S.V.; LEITE, H.G.; SOUZA, A.L. WOLFF, E. Evaluation of forest growth and carbon stock in forestry projects by system dynamics. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p.520-530, 2015.

MESSIER, C.; PUETTMANN, K. J. Forests as complex adaptive systems: implications for forest management and modelling. **Italian Journal of Forest and Mountain Environments**, v. 66, n. 3, p. 249-258, 2011.

RICHARDSON, G. P. **Feedback Thought in Social Science and Systems Theory**, Philadelphia, 1991.

SILVA, K. E.; SOUZA, C. R.; AZEVEDO, C. P.; ROSSI, L. M. B. Dinâmica florestal, estoque de carbono e fitossociologia de uma floresta densa de terra-firme na Amazônia Central. **Scientia florestalis**, v. 43, n. 105, p. 193-201, 2015.

SOUZA, A. L.; SOARES, C. P. B. **Florestas Nativas – Estrutura, Dinâmica e Manejo**. 1. ed. Viçosa, UFV, 2013. 322 p.

TRENBATH BR. The use of mathematical models in the development of shifting cultivation. In: J. Proctor (Ed.) *Mineral Nutrients in Tropical Forest and Savanna Ecosystems*, Blackwell, Oxford. P. 353-369, 1989.

VAN NOORDWIJK M. Productivity of intensified crop fallow rotations in the Trenbath model. **Agroforestry Systems**, v. 47, p. 223-237, 1999.

VAN NOORDWIJK, M. B.; VERBIST, G.; VINCENT and T. P. Tomich..**Simulation models that help us to understand local action and its consequences for global concerns in a forest margin landscape.** International Centre for Research in Agroforestry, Bogor, Indonesia. ASB Lecture Note 11A, 31 p, 2001.

## **CAPÍTULO I**

### **Relações causais na dinâmica da distribuição diamétrica de uma Floresta Estacional Semidecidual**

#### **RESUMO**

A administração dos recursos florestais com baixo impacto ambiental, gerando benefícios sociais e econômicos deve ser realizada de forma a não comprometer a disponibilidade dos recursos florestais. Para tanto, é importante entender como as florestas renovam os seus recursos. Uma destas formas é a utilização de modelos. Os modelos mais estudados para modelar a dinâmica das florestas nativas têm tido algumas limitações. Assim, o presente trabalho teve por objetivo propor um modelo para a dinâmica da área basal por classe diamétrica de uma floresta inequiânea, fazendo uso da Dinâmica de Sistemas. A mesma se baseia em mapas mentais, princípios como os sistemas de feedback, e o uso de equações diferenciais. O modelo proposto considera como eventos responsáveis pela dinâmica florestal o ingresso, crescimento e mortalidade de árvores. O sistema foi idealizado para que os eventos responsáveis pela dinâmica florestal sejam sensíveis as mudanças ocorridas na estrutura da própria floresta. Desta forma, o sistema proposto se torna uma importante ferramenta para avaliar o impacto de diferentes prescrições silviculturais sobre a estrutura da floresta, além de auxiliar em decisões acerca do ciclo de corte e da frequência de realização dos tratamentos silviculturais sobre a mesma.

#### **1. INTRODUÇÃO**

O manejo florestal é a administração dos recursos florestais com objetivos econômicos e sociais, gerando ao mesmo tempo o menor impacto possível ao meio ambiente de forma a não comprometer a disponibilidade desses recursos para as futuras gerações (SOUZA e SOARES, 2013). Segundo Campos e Leite (2013), o manejo florestal tem três pilares, a classificação da capacidade produtiva, a modelagem do crescimento e produção e as prescrições silviculturais. Conhecer a forma como a floresta renova seus recursos, bem como seu potencial qualitativo e quantitativo, é de extrema importância para o manejo florestal. Tal entendimento pode se dar na forma de modelos de crescimento e produção.

Existem três tipos de modelos de crescimento e produção. Os modelos em nível de povoamento (MNP), de árvores individuais (MAI) e os de distribuição de diâmetros (MDD). Os MDD foram empregados pela primeira vez em plantios (CLUTTER; BENNETT, 1965). Posteriormente, foram aderidos por mais pesquisadores, sendo utilizados na prognose de florestas inequiâneas pela primeira vez por Hyink e Moser (1979).

Os modelos de crescimento e produção florestal mais estudados para florestas naturais no Brasil são as Cadeias de Markov e o método de razões de movimentação (AUSTREGÉSILO et al., 2004; TEIXEIRA et al., 2007; STEPKA et al., 2010; EBLING et al., 2012). Entretanto, estes métodos apresentam algumas limitações. No tocante a Cadeia de Markov alguns trabalhos têm demonstrado que a validação destes modelos não foi satisfatória (BARDEN, 1980; AUSTREGÉSILO et al., 2004; DALLA LANA et al., 2015), sendo que um motivo para isto é que a sucessão florestal não é um processo estacionário (BIKLEY, 1980). Embora a projeção da distribuição de diâmetros seja mais acurada através do método da razão de movimentação, nas classes de diâmetro inferiores o método apresenta maior dificuldade de acompanhar os dados observados, em função da maior intensidade da dinâmica florestal nessas classes (EBLING et al., 2012; DALLA LANA et al., 2015).

Algumas características das florestas, como a influência que os níveis atuais dos parâmetros têm sobre o comportamento futuro da floresta, a grande quantidade de componentes e processos que fazem parte da mesma, bem como a constante interação entre estas partes e processos fazem com que sejam necessários novos métodos de modelagem, capazes de abordar a floresta como um sistema complexo (MESSIER; PUETTMANN, 2011).

Neste contexto surge a dinâmica de sistemas. Desenvolvida por Jay Forrester (FORRESTER, 1961), a mesma se baseia em conceitos como sistemas de feedbacks para a compreensão dos fenômenos da natureza. A dinâmica de sistemas é capaz de mostrar de forma clara as relações existentes nos sistemas complexos (KYUNG; MOOSUNG, 2005), e por isso pode ser usada para compreender o comportamento das florestas (MACHADO et al., 2015). Como limitação, a dinâmica de sistemas não se baseia em princípios estatísticos (BUONGIORNO, 1996).

Sabendo-se das limitações presentes nos modelos usuais e da adequabilidade que a dinâmica de sistemas apresenta, o presente trabalho propôs um modelo teórico em que

a dinâmica da área basal por classe de diâmetro em uma Floresta Estacional Semidecidual é simulada a partir de suas próprias características.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Dinâmica de Sistemas**

A linguagem utilizada no dia a dia é linear. Desta forma, os fatos são apresentados de forma sequencial (SENGE, 1990). As expressões geralmente têm um sujeito, que é o realizador da ação, e o objeto, aquele que sofre a ação. Desta forma, o sujeito A sempre é a causa do objeto B. Entretanto, existem situações onde A causa B e B causa A, em um efeito de realimentação ou feedback. Nestas situações, a linguagem tradicional encontra dificuldades em expressar este caminho circular, levando determinado raciocínio a ser falho (SENGE, 1990).

Neste contexto, o pensamento sistêmico se utiliza de diagramas para expressar estes sistemas de feedback, conhecidos como diagramas de enlace causal. A dinâmica de sistemas é caracterizada por dois tipos de abordagem. A *soft* se utiliza dos diagramas causais para entendimento do sistema a ser trabalhado de forma qualitativa (SCHON, 1982). A *hard* se utiliza de técnicas computacionais para modelagem quantitativa dos sistemas (LIU et al., 2011).

Em países desenvolvidos, a disciplina Dinâmica de Sistemas teve inúmeras aplicações em sistemas agro-ecológicos. Van Noordwijk et al. (2001) fez uma simulação, considerando a derrubada da floresta e verificando o efeito da queima dos restos sobre os minerais do solo. Para alguns nutrientes, como o Nitrogênio, houve perda, enquanto outros ficaram mais disponíveis no sistema, como o Fósforo. As simulações mostraram que os plantios de milho e amendoim, a partir da segunda colheita, tiveram produção baixa.

No contexto florestal em si, Schieritz e Milling (2003) trabalhou filosoficamente os pressupostos relacionados à Dinâmica de Sistemas e a simulação baseada em Agentes, verificando que modelos com detalhamento em nível de povoamento podem utilizar a dinâmica de sistemas, enquanto modelos com detalhamento a nível de árvores devem utilizar a abordagem a nível de agentes. Características da dinâmica de sistemas como o tratamento da heterogeneidade (MACHADO et al., 2015) e dos ruídos, aliada ao tempo de resposta a determinados choques foram apontadas como importantes para a modelagem do crescimento em uma floresta natural (SCHIERITZ; MILLING, 2003;

MACHADO et al., 2015). Os mesmos autores ainda discutem a possibilidade de integração entre as técnicas, de forma que elas se complementem e gerem resultados ainda mais sólidos.

Dudley (2004) utilizaram um diagrama de influências para examinar os critérios e indicadores do manejo florestal comunitário na Indonésia, envolvendo 2 tribos indígenas que viviam em uma área de concessão. Neste caso, a abordagem soft da Dinâmica de Sistemas foi utilizada de forma a solidificar a análise histórica da floresta explorada por ambas as tribos, bem como avaliar a sustentabilidade da atividade.

## **2.2. Características gerais do modelo proposto**

O modelo aqui proposto considera o fluxo de área seccional das árvores entre as diferentes classes de diâmetro. Tal fluxo ocorre sempre de uma classe diamétrica  $i$  para uma classe diamétrica superior, visto que as árvores não diminuem de tamanho. Desta forma, as variáveis de estoque do modelo são os somatórios de áreas seccionais das árvores em cada uma das classes de diâmetro, representando a área basal por classe de diâmetro.

A alimentação do sistema ocorre em dois processos distintos: crescimento das árvores que já estavam na floresta e o ingresso de novas árvores. Por outro lado, a mortalidade balanceia o sistema florestal.

Considerou-se que as árvores estavam distribuídas em oito classes de diâmetro, com amplitude de 10 cm cada. A menor classe abrange árvores com  $dap$  entre  $5 \leq dap < 15$  cm, a segunda apresenta árvores com  $dap$  de  $15 \leq dap < 25$  cm e assim sucessivamente. A última classe tem árvores com  $dap$   $75 \leq dap$ . Sendo assim, o modelo proposto apresenta oito variáveis de estoque, sendo cada uma o somatório das áreas seccionais das árvores pertencentes a respectiva classe.

Para elaboração do diagrama de fluxo utilizou-se o software Vensim Personal Learning Edition – PLE, da Ventana Systems versão 6.3/2013 para Windows.

## **3. RESULTADOS**

### **3.1. Modelo proposto**

#### **3.1.1. Ingresso**

Na literatura são consideradas três formas de se predizer o ingresso: modelando a produção e germinação de sementes, modelando o desenvolvimento de plântulas ou

predizendo o número de árvores que atingem o *dap* mínimo (MUHAIRWE, 2003). Dentro da última opção, o ingresso pode ser considerado estático ou dinâmico (VANCLAY, 1994). Ao se modelar o ingresso como dinâmico, diversos parâmetros do povoamento podem ser utilizados como variáveis independentes, como área basal (HANN, 1980; VANCLAY, 1989; KOHYAMA et al., 2001) e densidade (KOHYAMA, 1992; MUHAIRWE, 2003). No modelo em questão, propôs-se o ingresso em área seccional sendo influenciado por ambos parâmetros mencionados anteriormente (Figura 1).

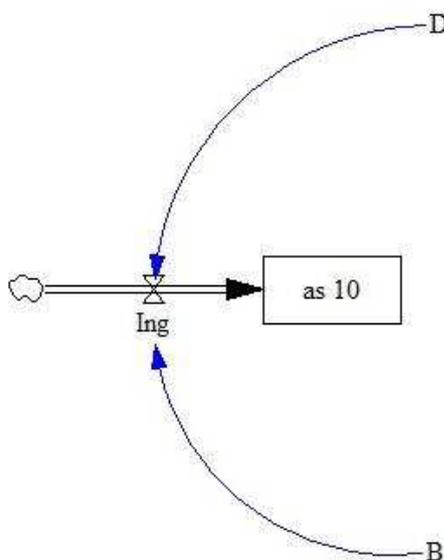


Figura 1 – Diagrama de fluxo mostrando as relações causais envolvidas no ingresso de novas árvores na primeira classe diamétrica as 10 ( $5 \leq dap < 15$  cm), em que D representa a densidade e B a área basal da floresta.

Numericamente, ingresso em área seccional pode ser descrito como:

$$\ln(ing) = \beta_0 + \beta_1 \ln(B) + \beta_2 \ln(D) \quad (1)$$

Em que *ing* é o ingresso em área seccional (m<sup>2</sup>); *B* é a área basal da floresta (m<sup>2</sup>); *D* é a densidade total da floresta (n/ha) e  $\beta_n$  são os parâmetros do modelo.

Originalmente, o modelo 1 foi utilizado para prever o número de árvores que ingressavam em uma floresta (NAMAALWA, et al., 2005). Como o estudo em questão almeja trabalhar com fluxo de área basal, o modelo sugerido será usado para modelar o ingresso em área basal.

### 3.1.2. Crescimento e taxas de mudança entre classes

As árvores na menor classe de diâmetro têm como opções, em um intervalo de tempo, se manter na classe, atingir a classe de diâmetro seguinte ou morrer. O processo responsável por permitir que as árvores mudem de classe diamétrica é o crescimento.

O crescimento é um processo limitado pela competição por espaço, luz, água e nutrientes existente na floresta. A competição pode ser expressada por variáveis que indiquem a densidade ou grau de ocupação da área (MONSERUD; STERBA, 1999), dentre elas a área basal. Por outro lado, o tamanho das árvores guarda relação proporcional com o processo em questão, sendo que árvores de diferentes tamanhos crescem a diferentes taxas (STEPHENSON, et al., 2014). Neste trabalho, para captar o efeito diferenciado do crescimento nas diferentes classes de tamanho, propôs-se o cálculo da taxa de crescimento individual de cada classe diamétrica. Além disso, separou-se o crescimento entre as árvores que permaneceram na classe de diâmetro e as árvores que mudaram de classe, de forma a controlar melhor ainda o processo em questão. O crescimento das árvores que mudaram de classe será contabilizado na classe diamétrica posterior.

Árvores de diferentes classes de diâmetro apresentam taxas de crescimento distintas (STEPHENSON, et al., 2014). Castro (2014) verificou, em uma floresta Estacional Semidecidual, que as árvores com diâmetro superior a 60 cm crescem a taxas muito maiores quando comparadas às árvores de diâmetros inferiores. Desta forma, o crescimento das árvores inferiores a 55 cm de *dap* foi modelado de forma distinta às árvores de *dap* maiores.

O crescimento das árvores inferiores a 55 cm seja descrito pelo modelo de Gompertz, da seguinte forma:

$$txc = \beta_0 \exp(-\exp(\beta_1 - \beta_2(-B))) \quad (2)$$

Em que *txc* é a taxa de crescimento da área seccional das árvores da classe diamétrica; *B* é a área basal da floresta e  $\beta_n$  são os parâmetros do modelo.

Este modelo apresenta tendência sigmoideal. Afinal, espera-se que o crescimento também tenha esta tendência. Entretanto, existem outros modelos que podem resultar na tendência necessária, sendo que a escolha do melhor fica a critério do usuário.

Para as árvores maiores, com no mínimo 55 cm de *dap*, sugere-se que o crescimento seja calculado com taxas médias constantes, visto que a competição não atua sobre as mesmas com a mesma intensidade. Afinal, estas árvores com estas dimensões

geralmente fazem parte do dossel superior, o que tem como consequência menor competição por espaço e luz (CUNHA, 2009).

As taxas de mudança seguem o mesmo comportamento do crescimento, visto que a mudança de uma classe diamétrica menor para uma maior é resultado do crescimento. Isto posto, o modelo utilizado para descrever o crescimento das árvores pode ser também utilizado para descrever as taxas de mudança, bem como o crescimento das árvores que mudaram de classe diamétrica.

### **3.1.3. Mortalidade**

A mortalidade pode ser classificada como regular e irregular (VANCLAY, 1994). Na mortalidade regular as árvores crescem próximas umas das outras, competindo por todos os recursos necessários à sobrevivência. Este tipo de mortalidade é mais comum em florestas mais densas. Além disso, árvores menores localizadas no sub-bosque estão submetidas a maior competição (MARTINS et al., 2011) e, portanto, são mais susceptíveis a este tipo de mortalidade. Por outro lado, as árvores maiores, por estarem no estrato superior da floresta, tem menor competição (CUNHA, 2009) e tem menor suscetibilidade a este tipo de mortalidade. Já a mortalidade irregular é causada por danos de insetos, fogo, doenças e outros.

Estudando uma floresta estacional Semidecidual, Castro et al. (2014) verificou que a probabilidade de mortalidade nas classes de diâmetro inferiores é maior, quando comparada às classes maiores. Esta tendência foi verificada em estudos em diversas florestas pelo mundo (PURVES et al., 2008; HURST et al., 2011; BENITO et al., 2013)

Dessa forma, no modelo em questão, a mortalidade é trabalhada de duas formas. Para as primeiras três classes de diâmetro, modela-se a mortalidade em função da competição a que as árvores estavam submetidas. Esta competição é medida por meio da área basal destas três classes diamétricas, afinal a interação espacial é o mecanismo primário de competição (FORD; SORENSEN, 1992; apud VANCLAY, 1995) e o espaço para estabelecimento de copa de uma árvore é disputado com aquelas árvores que se encontram no mesmo estrato vertical (HUTH; DITZER, 2001). A premissa de competição por espaço entre as copas foi utilizada no simulador de crescimento para florestas tropicais baseado em árvores individuais FORMIND (KOHLENER et al., 2001), gerando resultados satisfatórios para florestas da América do Sul (PÜTZ et al., 2011), América Central (RÜGER et al., 2008), e da Ásia (HUTH et al., 2005). Isto posto, temos

que a taxa de mortalidade pode ser explicada pelo modelo logístico, desenvolvido em 1838 por Verhulst, que é:

$$tm = \frac{\beta_0}{(1 + \beta_1 \exp(\beta_2 ASC))} \quad (3)$$

Em que  $tm$  é a taxa de mortalidade;  $ASC$  é a área basal dos indivíduos com  $dap$  inferior a 35 cm; e  $\beta_n$  são os parâmetros a serem estimados.

O modelo 3 é sigmoide. O esperado para a taxa de mortalidade é que ela tenha tendência exponencial, que pode ser captada pelo modelo em questão. Entretanto, é necessário verificar se os valores retornados para a taxa de mortalidade são menores que 1.

Como a competição interfere pouco na mortalidade das árvores de maiores classes de diâmetro, sugere-se o cálculo da mortalidade utilizando taxas médias fixas para cada classe.

### 3.2. Relações causais nas variáveis de estoque do modelo proposto

O somatório das áreas seccionais das árvores pertencentes à menor classe de diâmetro ( $5 \text{ cm} \leq dap < 15 \text{ cm}$ ) pode variar, entre dois períodos consecutivos, em função de:

- ingresso de novas árvores na primeira classe de diâmetro;
- mortalidade de árvores pertencentes a esta classe;
- crescimento das árvores que permaneceram nesta classe;
- mudança de árvores para a classe de diâmetro superior ( $15 \text{ cm} \leq dap < 25 \text{ cm}$ ).

Tais relações podem ser expressas na forma de um diagrama de fluxo (Figura 2).

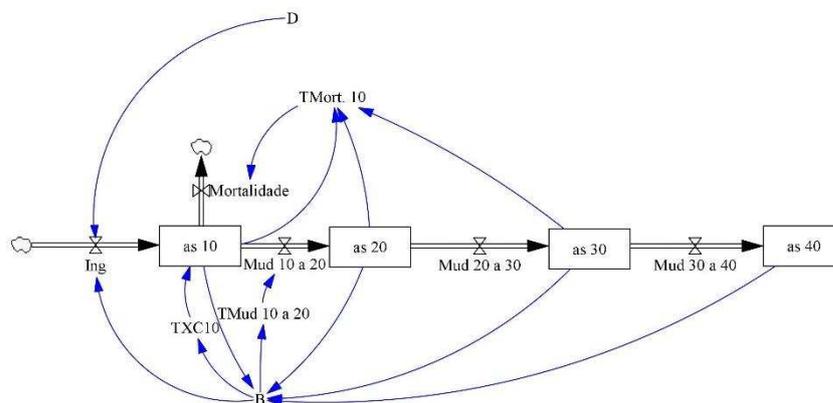


Figura 2 – Diagrama de fluxo mostrando as relações causais envolvidas na dinâmica da área basal na classe diamétrica as 10 ( $5 \leq dap < 15 \text{ cm}$ ).

A dinâmica da área basal pode ser expressa pela equação 4:

$$\frac{das_{10t}}{dt} = ing - TMort.10(as_{10_{t-1}}) - TMud.10 a 20 (as_{10_{t-1}}) + TXC10(as_{10_{t-1}}) \quad (4)$$

Em que  $as_{10}$  é o somatório das áreas seccionais das árvores com  $5 \text{ cm} \leq dap < 15 \text{ cm}$  (em  $\text{m}^2$ );  $ing$  é o somatório das áreas seccionais das árvores que ingressaram (em  $\text{m}^2$ );  $t$  é o período (em anos);  $TMort.10$  é a taxa de mortalidade da classe diamétrica em questão;  $TMud.10 a 20$  é a taxa de mudança para a classe diamétrica superior e  $TXC10$  é a taxa de crescimento das árvores que permaneceram na classe de diâmetro.

Na segunda classe diamétrica ( $15 \text{ cm} \leq dap < 25 \text{ cm}$ ), o somatório das áreas seccionais entre dois períodos consecutivos tem sua dinâmica em função de:

- crescimento de árvores da primeira classe de diâmetro ( $5 \text{ cm} \leq dap < 15 \text{ cm}$ ) e a consequente mudança das mesmas para a classe em questão;
- mortalidade de árvores pertencentes a esta classe;
- crescimento das árvores que permaneceram nesta classe;
- mudança de árvores para a classe superior ( $25 \text{ cm} \leq dap < 35 \text{ cm}$ ).

A equação diferencial que descreve estas forças é:

$$\frac{das_t}{dt} = TMud.10 a 20 (as_{10_{t-1}}) + TXCMud 10 a 20(TMud.10 a 20 (as_{10_{t-1}})) - TMort.20(as_{20_{t-1}}) - TMud.20 a 30 (as_{20_{t-1}}) + TXC20(as_{20_{t-1}}) \quad (5)$$

Em que  $as_{10}$  é o somatório das áreas seccionais das árvores com  $5 \text{ cm} \leq dap < 15 \text{ cm}$  (em  $\text{m}^2$ );  $TMud.10 a 20$  é o somatório das áreas seccionais das árvores que mudaram da classe inferior para a classe em questão (em  $\text{m}^2$ );  $TXCMud 10 a 20$  é a taxa de crescimento da área seccional que mudou da classe diamétrica inferior para a atual;  $t$  é o período (em anos);  $TMort.20$  é a taxa de mortalidade da classe diamétrica em questão;  $TMud.20 a 30$  é a taxa de mudança para a classe diamétrica superior;  $TXC20$  é a taxa de crescimento das árvores que permaneceram na classe de diâmetro; e  $t-1$  é o tempo anterior.

Na terceira classe ( $25 \text{ cm} \leq dap < 35 \text{ cm}$ ) a dinâmica do somatório das áreas seccionais é semelhante ao que ocorre na segunda classe diamétrica. Na quarta ( $35 \text{ cm} \leq dap < 45 \text{ cm}$ ) e quinta ( $45 \text{ cm} \leq dap < 55 \text{ cm}$ ) classes diamétricas, apesar dos processos que descrevem a dinâmica serem os mesmos, a mortalidade tem características distintas,



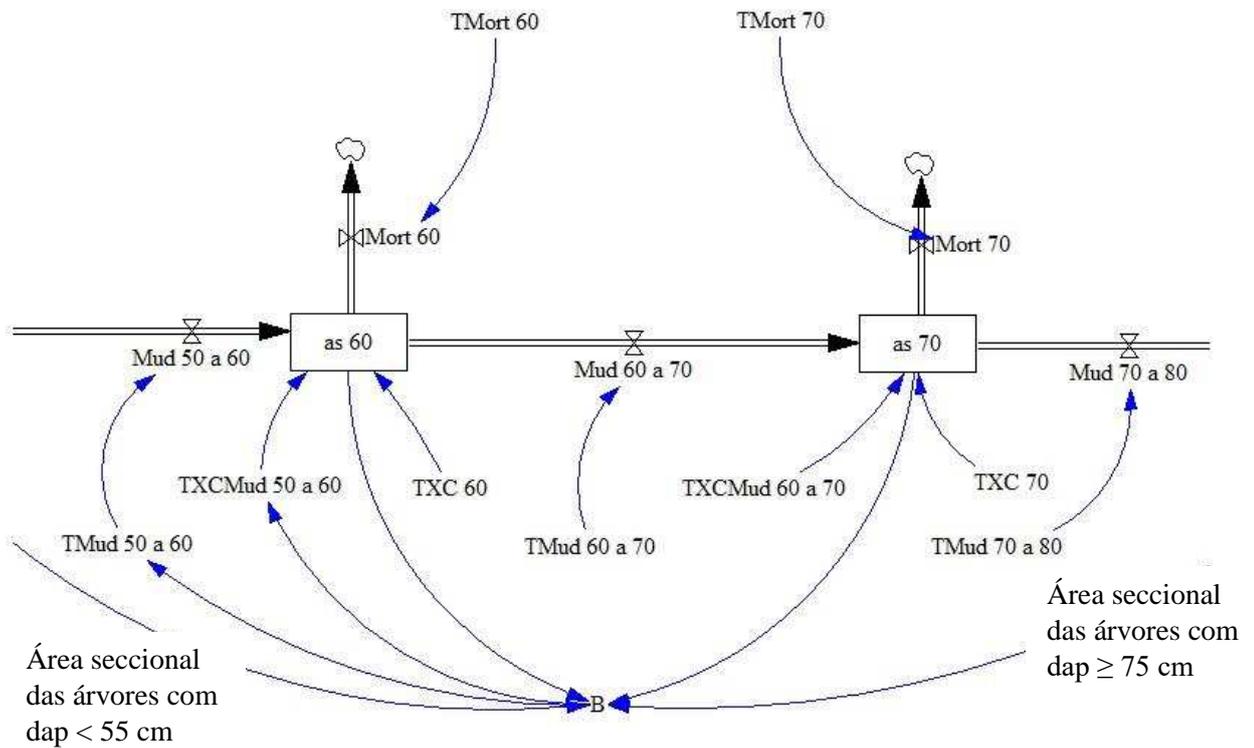


Figura 4 – Diagrama de fluxo mostrando as relações causais envolvidas na dinâmica da área basal nas classes diamétricas as 60 ( $55 \leq dap < 65$  cm) e as 70 ( $65 \leq dap < 75$  cm).

Na classe diamétrica, com  $dap \geq 75$  cm (oitava classe), não ocorre a mudança para uma classe superior, visto que a mesma é a última classe considerada. Desta forma, as árvores presentes nesta classe não têm a opção de migrar para uma classe superior (Figura 5).

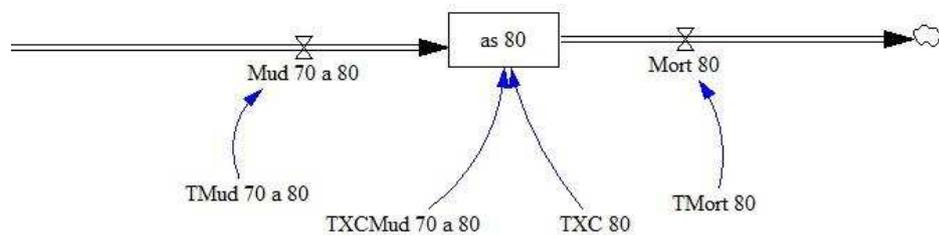


Figura 5 – Diagrama de fluxo mostrando as relações causais envolvidas na dinâmica da área basal na classe diamétrica as 80 ( $dap \geq 75$ cm).

Matematicamente, a dinâmica da área seccional na última classe é:

$$\frac{das_t}{dt} = TMud. 70 a 80 (as70_{t-1}) + TXCMud 70 a 80(TMud. 70 a 80 (as70_{t-1})) - TMort. 80(as_{t-1}) + TXC80(as_{t-1}) \quad (6)$$

Em que  $as 70$  é o somatório das áreas seccionais das árvores com  $65 \text{ cm} \leq dap < 75 \text{ cm}$  (em  $\text{m}^2$ );  $TMud. 70 a 80$  é o somatório das áreas seccionais das árvores que mudaram da classe inferior para a classe em questão (em  $\text{m}^2$ );  $TXCMud 70 a 80$  é a taxa de crescimento da área seccional que mudou da classe diamétrica inferior para a atual;  $t$  é o período (em anos);  $TMort. 80$  é a taxa de mortalidade da classe diamétrica em questão e;  $TXC80$  é a taxa de crescimento das árvores que permaneceram na classe de diâmetro.

O diagrama de fluxo completo (Figura 6) mostra todas as relações causais presentes no modelo que está sendo proposto. Na tabela 1 são apresentados os significados de todas as siglas utilizadas no mesmo.

Tabela 1 – Significado das siglas presentes na figura 6.

| Sigla           | Significado                                                                        | Unidade         |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| as i            | Somatório das áreas seccionais das árvores na classe i                             | $\text{m}^2$    |
| <as i>          | Variável sombra para as i                                                          | $\text{m}^2$    |
| TMort i         | Taxa de mortalidade na área seccional que permaneceu na classe i                   | $\text{t}^{-1}$ |
| TXC i           | Taxa de crescimento na área seccional que permaneceu na classe i                   | $\text{t}^{-1}$ |
| TMud i a i+10   | Taxa de mudança na área seccional entre as classes i e classe superior             | $\text{t}^{-1}$ |
| TXCMud i a i+10 | Taxa de crescimento na área seccional que mudou da classe i para a classe superior | $\text{t}^{-1}$ |
| Mort. I         | Área seccional morta na classe i                                                   | $\text{m}^2$    |
| Mud i+10        | Área seccional que mudou da classe i para a classe superior                        | $\text{m}^2$    |
| ASC             | Somatório das áreas seccionais das classes as 10, as 20 e as 30                    | $\text{m}^2$    |
| N i             | Número de árvores da classe i por hectare                                          | Árvores/ha      |
| D               | Densidade total                                                                    | Árvores/ha      |
| I               | Centro de diâmetro da classe, que compreende $i-5 \leq i < i+5$                    | cm              |

\*Obs: variável sombra é a representação da variável de interesse em outro local em um mesmo diagrama, com a finalidade organizacionais.

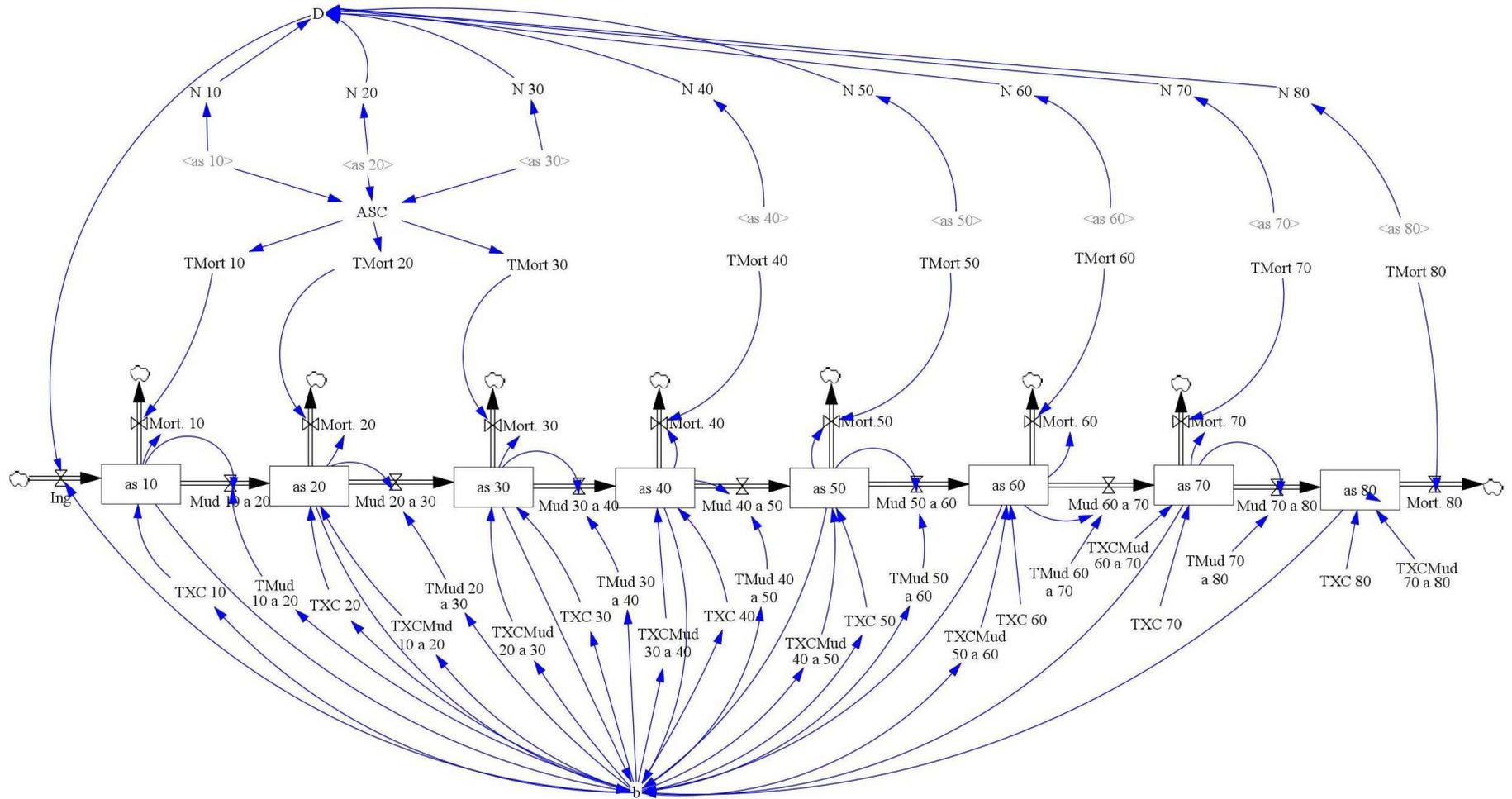


Figura 6 – Diagrama de fluxo representando as relações causais envolvidas na dinâmica da distribuição de diâmetro em uma floresta.

#### 4. DISCUSSÃO

O ciclo de vida de uma floresta, processo conhecido como sucessão florestal, apresenta diversas fases (LOHBECK et al., 2014) sendo que cada parte desta sucessão tem sua composição de espécies florestais características. Nos estágios inicial e médio, a floresta cresce a taxas crescentes, passando pelos estágios sucessionais secundário inicial e médio. Ao chegar no estágio sucessional secundário avançado, a taxa de crescimento da floresta começa a cair, até chegar a zero, quando a floresta atinge seu estado clímax. Neste processo de crescimento, a biodiversidade cresce atingindo seu máximo no estágio secundário avançado, momento onde há maior quantidade de nichos ecológicos (ODUM, 1986).

Ao longo do ciclo de vida da floresta, o estoque volumétrico não é fixo, sendo que o mesmo apresenta uma curva de crescimento de tendência sigmoideal (PODOR et al, 2014). O crescimento da floresta é resultado de complexas interações de forças relativas ao metabolismo, fotossíntese, absorção de nutrientes e potencial biológico de cada indivíduo, sendo que estas características mudam de espécie para espécie (SOUSA e SOARES, 2013). Além disso, forças catabólicas como a competição entre plantas, respiração, estresses, limitação dos recursos naturais e outros também influenciam diretamente no crescimento da floresta (SOUSA e SOARES, 2013).

Assim, em uma comunidade florestal, existe um grande conjunto de variáveis, com maior ou menor grau de inter-relação (SOUZA e SOARES, 2013; MESSIER; PUETTMANN, 2011).

Por considerar o efeito que o estado atual da floresta tem sobre os processos dinâmicos da floresta, principalmente nas menores classes de diâmetro, o modelo proposto apresenta as características necessárias para entender mais precisamente a dinâmica florestal. Assim, atende-se às características que as florestas apresentam, como a interação entre as diversas partes e processos dinâmicos da floresta (SOUZA; SOARES, 2013; MESSIER; PUETTMANN, 2011). Além disso, evita equívocos que causam problemas na modelagem, como a utilização de matrizes de transição estacionárias para modelar a estrutura diamétrica das florestas (BIKLEY, 1980), o que pode levar a erros na predição (AUSTREGÉSILO et al., 2004; DALLA LANA et al., 2015). Estes erros são maiores nas classes de diâmetro inferiores, afinal nessas a dinâmica é mais acentuada (EBLING et al., 2012; DALLA LANA et al., 2015).

Além dos modelos de crescimento e produção, abordagem utilizada neste trabalho, existem os modelos mecanísticos. A aceitabilidade que a dinâmica de sistemas tem em incluir novas variáveis exógenas faz com que esta abordagem possa ser utilizada nesses modelos, que se utilizam variáveis ambientais para modelagem.

## **5. CONCLUSÕES**

Diante do que foi discutido, conclui-se que:

- Foi possível representar os processos que interferem na dinâmica florestal por meio de um diagrama de fluxo;
- O modelo proposto apresenta as características necessárias à modelagem da distribuição por classe de diâmetro em florestas inequiâneas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUSTREGÉSILO, S.L.; FERREIRA, R.L.C.; SILVA, J.A.A.; SOUZA, A.L.; MEUNIER, I.M.J.; SANTOS, E.S. Comparação de métodos de prognose da estrutura diamétrica de uma floresta estacional semidecidual secundária. **Revista Árvore**, v. 28, n. 2, p. 227-232, 2004.

BARDEN, L.S. Tree replacements in a cove hardwood forest of the Southern Appalachians, in: **OIKOS**, vol. 35, p.16-19, 1980.

BENITO, P. R.; LINES, E. R.; APARICIO, L. G.; ZAVALA, M. A.; COOMES, D. A. Patterns and Drivers of Tree Mortality in Iberian Forests: Climatic Effects Are Modified by Competition. **PLOS one**, v. 8, n. 2, p. 1-10, 2013.

BINKLEY, C.S. Is succession in hardwood forests a stationary Markov process? **Forest Sci.**, vol.26, p. 566-570, 1980.

BUONGIORNO, J. Forest sector modeling: a synthesis of econometrics, mathematical programming, and system dynamics methods. **International Journal of Forecasting**, v. 12, p. 329-343, 1996.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2013. 605 p.

CASTRO, R. V. O.; SOARES, C; LEITE, H; SOUZA, A.; MARTINS, F.; NOGUEIRA, G.; OLIVEIRA, M.; SILVA, F. Competição em Nível de Árvore Individual em uma Floresta Estacional Semidecidual. **Silva Lusitana**, v. 22, n. 1, p. 43-66, 2014.

CLUTTER, J. L.; BENETT, F. A. Diameter distributions in old-field slash pine plantations. Georgia Forest Research Council Report, Macon, GA, n. 13, p. 1-9, 1965.

CUNHA, T. A. **Modelagem do incremento de árvores individuais de *Cedrella odorata* L. na Floresta Amazônica**. 2009. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DALLA LANA, M.; PÉLLICO NETTO, S.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETA, C. R.; EBLING, A. A. Prognose da Estrutura Diamétrica em Floresta Ombrófila Mista. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 1, p. 71-78, 2015.

DUDLEY, R. G. Modelling the effect of a log export ban in Indonesia. **System Dynamics Review**, v. 20, n. 2, p. 99-116, 2004.

EBLING, A.A.; WATZLAWICK, L.F.; RODRIGUES, A.L.; LONGHI, S.J.; LONGHI, R.V.; ABRÃO, S.F. Acuracidade da distribuição diamétrica entre métodos de projeção em Floresta Ombrófila Mista. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, n.6, p.1020-1026, 2012.

FORRESTER, J.W. **Industrial Dynamics**. MIT Press: Cambridge, MA, 1961. 464 p.

HANN, D. W. **Development and evaluation of an even- and uneven-aged ponderosa pine/Arizona Fescue stand simulator**. Ogden: Forest Service/Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1980. 95 p. (Research Paper, n. 267).

HYINK, D. M.; MOSER, J. W. Application of diameter distributions for yield projection in uneven-aged forests. In: FRAYER, W. E. (Ed.). *Forest resource inventories: proceedings of a workshop*. Fort Collins: Colorado State University, 1979. P. 906-916.

HURST, J. M.; ALLEM, R. B.; COOMES, D. A.; DUNCAN, R. P. Size-specific tree mortality varies with neighbourhood crowding and disturbance in a montane *Nothofagus* forest. **PLoS ONE**, v. 6, n. 10, 2011.

HUTH, A.; DITZER, T. Long-term impacts of logging in a tropical rain forest - a simulation study. **Forest Ecology and Management**, v. 142, n. 1-3, p. 33-51, 2001.

HUTH, A.; DRECHSLER, M.; KÖHLER, P. Using multicriteria decision analysis and a forest growth model to assess impacts of tree harvesting in Dipterocarp lowland rain forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 207, n. 1-2, p. 215-232, 2005.

KOHLER, P.; DITZER, T.; ONG, R. C.; HUTH, A. Comparison of measured and modelled growth on permanent plots in Sabahs rain forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 144, n. 1-3, p. 101-111, 2001.

KOHYAMA, T.; SUZUKI, E.; PARTOMIHARDJO, T.; YAMADA, T. Dynamic steady state of patch mosaic tree-size structure of a mixed dipterocarp forest regulated by local crowding. **Ecological Research**, Tsukuba, v. 16, n.1, p. 85-98, 2001.

KOHYAMA, T. Size-structured multi-species model of rain forest trees. **Functional Ecology**, Oxford, v. 6, n. 2, p. 206-212, 1992.

KYUNG, M. K.; MOOSUNG, J. A quantitative assessment of LCOs for operations using system dynamics. **Reliab. Engi. Syst.**, v. 87, p. 211-222, 2005.

LINES, E. R.; COOMES, D. A.; PURVES, D. W. Influences of forest structure, climate and species composition on tree mortality across the Eastern US. **PloS ONE**, v. 5, n. 10, p. 1-12, 2010.

LIU, D.; YANG, X.; TIAN, X.; WU, R.; WANG, L. Study on integrated simulation model of economic, energy and environment safety system under the lowcarbon policy in Beijing. **Proced. Environ. Sci.** v. 5, p.120-130, 2011.

LOHBECK, M.; POORTER, L.; MARTINEZ-RAMOS, M.; RODRIGUES-VELAZQUEZ, J.; VAN BRUGEL, M.; BONGERS, F. Changing drivers of species dominance during tropical forest succession. **Functional Ecology**, v. 28, n. 4, p. 1052-1058, 2014.

MACHADO, R.R.; CONCEIÇÃO, S.V.; LEITE, H.G.; SOUZA, A.L. WOLFF, E. Evaluation of forest growth and carbon stock in forestry projects by system dynamics. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, n. 1, p.1-11, 2015.

MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; CASTRO, R. V. O. Índices de competição em árvores individuais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1089-1098, 2011.

MESSIER, C.; PUETTMANN, K. J. Forests as complex adaptive systems: implications for forest management and modelling. **Italian Journal of Forest and Mountain Environments**, v. 66, n. 3, p. 249-258, 2011.

MONSERUD, R. A.; STERBA, H. Modeling individual tree mortality for Austrian forest species. **Forest Ecology and Management**, v. 113, n. 2-3, p. 109-123, 1999.

MUHAIWE, C. K. **Biometric Models**. Sydney: Resource and Conservation Assessment Council, 2003. 46 p. (NAND 08; v. 5.).

NAMAALWA, J.; EID, T.; SANKHAYAN, P. A multi-species density-dependent matrix growth model for the dry woodlands of Uganda. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 213, n. 1-3, p. 312-327, 2005.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Editora Guanabara: Rio de Janeiro, 1986. 343 p.

PODOR, Z.; MANNINGER, M.; JEREB, L. Application of Sigmoid Models for Growth Investigations of Forest Trees. In: VAN DO, T.; LE THI, H. A.; NGUYEN, N. T. **Advanced Computational Methods for Knowledge Engineering**. Warsaw: Springer, 2014. cap. 6, p. 353-366.

PÜTZ, S.; GROENEVELD, J.; ALVES, L.F.; METZGER, J.P.; HUTH, A. Fragmentation drives tropical forest fragments to early successional states: A modelling study for Brazilian Atlantic forests. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 12, p. 1986-1997, 2011.

RÜGER, N.; WILLIAMS-LINERA, G.; KISSLING, W.D.; HUTH, A. Long-term impacts of fuelwood extraction on a tropical montane cloud forest. **Ecosystems**, v. 11, n. 6, p. 868-881, 2008.

SCHIERITZ, N.; MILLING, P. Modeling the Forest or Modeling the Trees: A Comparison of System Dynamics and Agent-Based Simulation. Anais... In: 21<sup>st</sup> System Dynamics Conference, 2003. Available on <http://www.systemdynamics.org/conferences/2003/proceed/PAPERS/140.pdf> Access in 10 mar 2015.

SCHON, D. A. **The Reflective Practitioner, How Professionals Think in Action**. New York: Basic Books, 1982.

SENGE, P. M. **The fifth discipline**. New York, Doubleday, 1990. 466 p.

SOUZA, A. L.; SOARES, C. P. B. **Florestas Nativas – Estrutura, Dinâmica e Manejo**. 1. ed. Viçosa, UFV, 2013. 322 p.

STEPHENSON, N. L.; DAS, A. J.; CONDIT, R.; RUSSO, S. E.; BAKER, P. J.; BECKMAN, N. G.; COOMES, D. A.; LINES, E. R.; MORRIS, W. K.; RUGER, N.; ÁLVAREZ, E.; BLUNDO, C.; BUNYAVEJCHEWIN, S.; CHUYONG, G.; DAVIES, S. J.; DUQUE, Á.; EWANGO, C. N.; FLORES, O.; FRANKLIN, J. F.; GRAU, H. R.; HAO, Z.; HARMON, M. E.; HUBBEL, S. P.; KENFACK, D.; LIN, Y.; MAKANA, J. R.; MALIZIA, A.; MALIZIA, L. R.; PABST, R. J.; PONGPATTANANURAK, N.; SU, S. H.; SUN, I. F.; TAN, S.; THOMAS, D.; VAN MANTGEM, P. J.; WANG, X.; WISER, S. K.; ZAVALA, M. A. Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. **Nature**, v. 507, n. 7490, p. 90 – 93, 2014.

STEPKA, T. F.; DIAS, A. N.; FILHO, A. F.; MACHADO, S. A.; SAWCZUK, A. R. Prognose da estrutura diamétrica de uma Floresta Ombrófila Mista com os métodos razão de movimentos e matriz de transição. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.30, n.64, p.327-335, 2010.

TEIXEIRA, L. M.; CHAMBERS, J. Q.; SILVA, A. R.; LIMA, A. J. N.; CARNEIRO, V. M. C.; SANTOS, J; HIGUCHI, N. Projeção da dinâmica da floresta natural do Terra-Firme, região de Manaus-AM, com uso da cadeia de transição probabilística de Markov. **Acta Amazônica**, v.37, n.3, p. 377-384, 2007.

VAN NOORDWIJK, M.; VERBIST, B.; VINCENT, G.; TOMICH, T. P. **Simulation models that help us to understand local action and its consequences for global concerns in a forest margin landscape.** International Centre for Research in Agroforestry, Bogor, Indonesia. ASB Lecture Note 11A, 2001. 31pp.

VANCLAY, J. K. A growth model for North Queensland rainforests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 27, n. 3-4, p. 245-271, 1989.

VANCLAY J. K. **Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests.** - Wallingford : CAB International, 1994.

VANCLAY, J. K. Growth models for tropical forests: a synthesis of models and methods. Disponível em: < [http://espace.library.uq.edu.au/eserv/UQ:8366/R048\\_fs\\_pp.pdf](http://espace.library.uq.edu.au/eserv/UQ:8366/R048_fs_pp.pdf)> Acesso em: 14 set 2015.

## CAPÍTULO II

### **Projeção da distribuição diamétrica de uma Floresta Estacional Semidecidual utilizando Dinâmica de Sistemas**

#### **RESUMO**

O presente trabalho teve por objetivo parametrizar e validar um simulador da distribuição de área basal por classe de diâmetro, utilizando-se a abordagem de dinâmica de sistemas. Os dados utilizados são de uma floresta estacional semidecidual, onde 10 parcelas foram alocadas e medidas nos anos de 1994, 1997, 2000, 2004, 2008 e 2012. Os inventários entre 1994 e 2008 foram utilizados para parametrizar o modelo dinâmico, enquanto o ano de 2012 foi utilizado na validação do mesmo. A parametrização foi feita com sucesso, visto que a área basal por classe diamétrica nos anos de 1997, 2000, 2004 e 2008 não diferiu da simulada pelo modelo, ao nível de 5% de significância. Além disso, o ingresso e a mortalidade simulados tiveram, respectivamente, correlação de 0,501 e 0,362 com os dados observados. A área basal por classe diamétrica simulada pelo modelo para o ano de 2012 não diferiu significativamente da observada. Desta forma, conclui-se que a dinâmica de sistemas pode ser utilizada para projeção da distribuição diamétrica e que, o simulador em questão pode ser utilizado a projeção da distribuição diamétrica.

#### **1. INTRODUÇÃO**

A Mata Atlântica é um importante bioma brasileiro, sendo o 4º maior em área (13% do território brasileiro), o 2º em estoque de madeira e o 3º em biomassa (BRASIL, 2013). Entretanto, ao longo dos anos o mesmo tem sido altamente explorado, sendo que sua área florestal hoje representa 8,8% de sua área original (SOS MATA ATLÂNTICA, 2012). Diante de tal quadro, são necessárias formas de se viabilizar a manutenção das florestas em pé para que as mesmas continuem a fornecer seus produtos e serviços.

Uma das formas de se garantir a manutenção das florestas em pé é o manejo florestal, afinal este permite o uso dos recursos florestais sem que haja conversão no uso do solo. O mesmo tem importante função econômica, ao buscar o lucro para as empresas. Ao mesmo tempo tem função social importante, pois gera renda e oportunidade de trabalho para a sociedade. Todos estes benefícios são obtidos com o menor impacto possível sobre a natureza e o uso contínuo dos recursos florestais de forma a evitar a degradação (VANCLAY, 1994; HIGUCHI et al., 2008; SOUZA e SOARES, 2013).

O conhecimento dos aspectos silviculturais dos povoamentos florestais é de grande importância (HOSOKAWA et al., 2008) e as prescrições silviculturais representam um dos pilares do manejo florestal (CAMPOS; LEITE; 2013). Entretanto, poucos estudos se dedicaram a investigação de prescrições silviculturais para a Mata Atlântica. Um dos possíveis motivos para esta carência é a dificuldade em se conseguir licenças ambientais para este tipo de trabalho.

Uma forma para superar tal dificuldade é a utilização de simulação. Alguns trabalhos que se dedicaram a isso foram feitos por Sanqueta (1999), Huth e Ditzer (2001) e Azevedo et al. (2008). Para tanto, é necessário que se tenha modelos capazes de descrever e simular a dinâmica florestal e, ao mesmo tempo, ter nas suas saídas sensibilidade para com os diferentes níveis de alteração proposto.

Neste contexto a dinâmica de sistemas surge como uma ferramenta capaz de dar as respostas pretendidas, em função de sua característica de acompanhamento do movimento das variáveis (FORRESTER, 1961).

Este estudo teve por objetivo parametrizar e validar um simulador da dinâmica da distribuição de diâmetros em uma Floresta Estacional Semidecidual, utilizando-se da Dinâmica de Sistemas.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Área de estudo**

O trabalho foi conduzido em um Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual Montana, no município de Viçosa, Minas Gerais (20°45'S e 42°51'W), sendo conhecida como Mata da Silvicultura. O fragmento em questão tem cerca de 17 ha e seu estágio sucessional pode ser considerado como transição do secundário médio para o avançado (FIGUEIREDO et al., 2013).

De acordo com a classificação de Koppen, o clima da região onde a Mata se insere é do tipo Cwa, temperado quente, mesotérmico úmido com verões chuvosos e invernos secos (ALVARES et al., 2013). A temperatura média máxima é de 26°C, enquanto a média mínima chega aos 14°C, com precipitação média anual em torno de 1300 mm (OLIVEIRA JUNIOR; DIAS, 2005).

Os solos da região são predominantemente latossolos, nos topos e encostas das elevações, e argissolos, nos terraços. A topografia da região é muito acidentada, com altitude variando entre 600 e 970 metros (CORREA, 1984).

## 2.2.Dados

Foram utilizados dados de um inventário florestal contínuo conduzido na Mata da Silvicultura. O mesmo consiste em 10 parcelas retangulares de área fixa, 0,1 hectares e dimensões 20 m x 50 m. Dentro de cada parcela, todos os indivíduos com  $dap \geq 5$  cm foram identificados ao nível de espécie, tiveram seu  $dap$  medido e suas alturas do fuste e total estimadas com auxílio de um hipsômetro, no ano de 1994.

Nos inventários florestais seguintes (1997, 2000, 2004, 2008, 2010, 2012), as parcelas foram remedidas, as árvores mortas e as jovens árvores que atingiram os 5 cm de  $dap$ , processo conhecido como ingresso, foram contabilizadas.

## 2.3.Modelo dinâmico

O modelo utilizado se baseia na dinâmica de sistemas para a modelagem da distribuição da área basal por classe de diâmetro. Nele, ocorre o fluxo de área basal entre as diferentes classes de diâmetro, sendo que o sentido do mesmo é sempre de uma classe diamétrica inferior para uma superior.

Os processos responsáveis pela dinâmica da distribuição da área basal por classe de diâmetro são o ingresso de novas árvores, o crescimento e a mortalidade das árvores que já faziam parte da estrutura avaliada.

A área basal em cada classe de diâmetro é controlada por variáveis de estoque, sendo que a dinâmica nas mesmas é controlada empregando equações diferenciais.

No diagrama de fluxo, as árvores se distribuem em oito classes de diâmetro, com amplitude de 10 cm cada. A classe inferior tem árvores com  $dap$  no intervalo  $5 \leq dap < 15$  cm, a segunda apresenta árvores com  $dap$  de  $15 \leq dap < 25$  cm e assim sucessivamente, sendo que na última classe, as árvores têm  $dap$  mínimo de 75cm. Desta forma, o modelo tem oito variáveis de estoque.

Na primeira classe de diâmetros, a equação diferencial que descreve a dinâmica é:

$$\frac{das_{10t}}{dt} = ing - TMort.10(as_{10_{t-1}}) - TMud.10 a 20 (as_{10_{t-1}}) + TXC10(as_{10_{t-1}}) \quad (1)$$

Em que  $as_{10}$  é a área basal das árvores com  $5 \text{ cm} \leq dap < 15 \text{ cm}$  (em  $\text{m}^2$ );  $ing$  é a área basal ingressante (em  $\text{m}^2$ );  $t$  é o período (em anos);  $TMort.10$  é a taxa de mortalidade da classe diamétrica em questão;  $TMud.10 a 20$  é a taxa de mudança para a classe

diamétrica superior e  $TXC10$  é a taxa de crescimento das árvores que permaneceram na classe de diâmetro.

Da segunda à sétima classe diamétrica não há ingresso, sendo que a alimentação da mesma ocorre com a mudança de árvores da classe anterior:

$$\frac{dasx_t}{dt} = TMud. x1 a x (asx1_{t-1}) + TXCMud x1 a x(TMud. x1 a x (asx1_{t-1})) - TMort. x(asx_{t-1}) - TMud. x a x2 (asx_{t-1}) + TXCx(asx_{t-1}) \quad (2)$$

Em que  $asx1$  é a área basal das árvores da classe diamétrica anterior a avaliada (em m<sup>2</sup>);  $TMud. x1 a x$  é a área basal das árvores que mudaram da classe inferior para a classe em questão (em m<sup>2</sup>);  $TXCMud x1 a x$  é a taxa de crescimento da área basal que mudou da classe diamétrica inferior para a atual;  $t$  é o período (em anos);  $TMort. x$  é a taxa de mortalidade da classe diamétrica em questão;  $TMud. x a x2$  é a taxa de mudança para a classe diamétrica superior e  $TXCx$  é a taxa de crescimento das árvores que permaneceram na classe de diâmetro.

As árvores da última classe de diâmetro não têm a opção de migrar para uma classe superior. Desta forma, a equação diferencial que descreve sua dinâmica é:

$$\frac{das_t}{dt} = TMud. 70 a 80 (as70_{t-1}) + TXCMud 70 a 80(TMud. 70 a 80 (as70_{t-1})) - TMort. 80(as_{t-1}) + TXC80(as_{t-1}) \quad (3)$$

Em que  $as 70$  é a área basal das árvores com  $65 \text{ cm} \leq dap < 75 \text{ cm}$  (em m<sup>2</sup>);  $TMud. 70 a 80$  é a área basal das árvores que mudaram da classe inferior para a classe em questão (em m<sup>2</sup>);  $TXCMud 70 a 80$  é a taxa de crescimento da área basal que mudou da classe diamétrica inferior para a atual;  $t$  é o período (em anos);  $TMort. 80$  é a taxa de mortalidade da classe diamétrica em questão e;  $TXC80$  é a taxa de crescimento das árvores que permaneceram na classe de diâmetro.

A relações causais demonstram como os parâmetros da própria floresta afetam os processos associados à dinâmica florestal (Figura 1). As siglas presentes na Figura 1 estão descritas na tabela 1.

Tabela 1 – Significado das siglas presentes na figura 6.

| Sigla           | Significado                                                                    | Unidade         |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| as i            | Somatório das áreas basais das árvores na classe i                             | m <sup>2</sup>  |
| <as i>          | Variável sombra para as i                                                      | m <sup>2</sup>  |
| TMort i         | Taxa de mortalidade na área basal que permaneceu na classe i                   | t <sup>-1</sup> |
| TXC i           | Taxa de crescimento na área basal que permaneceu na classe i                   | t <sup>-1</sup> |
| TMud i a i+10   | Taxa de mudança na área basal entre as classes i e classe superior             | t <sup>-1</sup> |
| TXCMud i a i+10 | Taxa de crescimento na área basal que mudou da classe i para a classe superior | t <sup>-1</sup> |
| Mort. I         | Área basal morta na classe i                                                   | m <sup>2</sup>  |
| Mud i+10        | Área basal que mudou da classe i para a classe superior                        | m <sup>2</sup>  |
| ASC             | Somatório das áreas basais das classes as 10, as 20 e as 30                    | m <sup>2</sup>  |
| N i             | Número de árvores da classe i por hectare                                      | Árvores/ha      |
| D               | Densidade total                                                                | Árvores/ha      |
| I               | Centro de diâmetro da classe, que compreende $i-5 \leq i < i+5$                | cm              |

\*Obs: variável sombra é a representação da variável de interesse em outro local em um mesmo diagrama, com a finalidade organizacional.

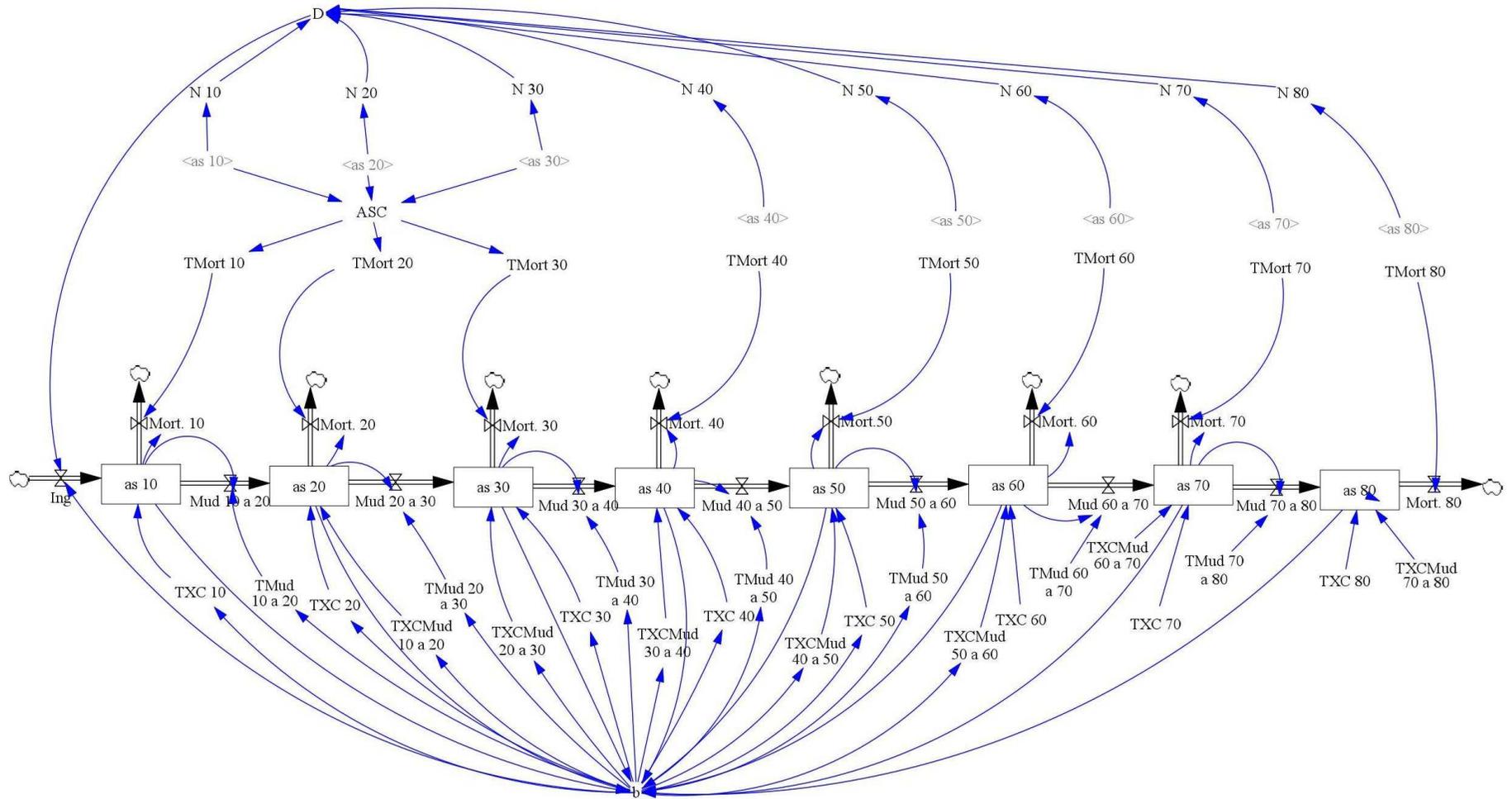


Figura 1 – Diagrama de fluxo representando as relações causais envolvidas na dinâmica da distribuição de diâmetros em uma floresta.

## 2.4. Calibração do modelo

Para a calibração do modelo, utilizou-se os dados de inventário florestal contínuo nos anos de 1994, 1997, 2000, 2004 e 2008. As equações estimadas para calibração do modelo podem ser vistas no anexo 1.

A calibração do modelo foi realizada de forma que as saídas do modelo tenham frequência bi-anual, começando pelo ano de 1994.

## 2.5. Avaliação da calibração do modelo

### 2.5.1. Distribuição de área basal por classe diamétrica

Para comparar a distribuição da área basal por classe diamétrica simulada com a observada, foram aplicados os testes Qui-quadrado (PREACHER, 2001) e Komolgorov-Smirnov (PINTO et al., 2015) a 5% de significância.

### 2.5.2. Ingresso e mortalidade

O ingresso e mortalidade, todos em  $m^2ha^{-1}$ , foram avaliados pelo Coeficiente de correlação linear de Pearson (CAMPOS; LEITE, 2013), calculado da seguinte forma:

$$R_{\hat{Y}Y} = \frac{n^{-1}(\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)(Y_i - \bar{Y}))}{\sqrt{(n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)^2)(n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2)}} \quad (4)$$

Em que  $R_{\hat{Y}Y}$  é o Coeficiente de Correlação linear entre valores observados ( $Y_i$ ) e simulados ( $\hat{Y}_i$ );  $\hat{Y}_m$  é a média dos valores simulados;  $\bar{Y}$  é a média aritmética dos valores observados e  $n$  é o número de observações.

Além disso, calculou-se a Média das diferenças absolutas (MDA) (CAMPOS; LEITE, 2013):

$$MDA = n^{-1} \sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i| \quad (5)$$

Em que  $MDA$  é a média das diferenças absolutas,  $\hat{Y}_i$  e  $Y_i$  são, respectivamente, os valores simulados e observados da variável de interesse e  $n$  é o número de observações.

## 2.6. Validação do modelo

Para validar o modelo, simulou-se a área basal por classe de diâmetro tendo como base o ano de 1994 e o ano final 2012. A área basal por classe diamétrica simulada no ano de 2012 foi comparada à observada por meio de testes de aderência Qui-quadrado e Komolgorov-Smirnov. Tal procedimento faz com que os erros do modelo proposto se propagem desde 1994 até 2012, perfazendo período de 18 anos. Com isso, a validação atestaria a eficiência do modelo em compreender a variação existente nos dados.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Avaliação do modelo calibrado

##### 3.1.1. Área basal por classe diamétrica

A dinâmica da distribuição diamétrica estimada entre os anos de 1994 e 2008 teve aderência à observada, visto que as distribuições de área basal por classe de diâmetro simuladas não diferiram estatisticamente das distribuições observadas, a 5% de significância (Tabela 2).

Tabela 2 – Aderência da área basal por classe de diâmetro simulada à observada, pelos testes Qui-quadrado e Komolgorov -Smirnov, nos anos de 1997, 2000, 2004 e 2008, em uma Floresta Estacional Semidecidual na região de Viçosa, MG.

| Classe de diâmetro | $\chi^2$           |                    |                    |                    | $ Dif_{obs} - Dif_{sim} $ |                       |                       |                       |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                    | 1997               | 2000               | 2004               | 2008               | 1997                      | 2000                  | 2004                  | 2008                  |
| 10                 | 0,00               | 0,01               | 0,01               | 0,00               | 0,007 <sup>ns</sup>       | 0,007 <sup>ns</sup>   | 0,005 <sup>ns</sup>   | 0,005 <sup>ns</sup>   |
| 20                 | 0,00               | 0,00               | 0,02               | 0,00               | 0,008 <sup>ns</sup>       | 0,002 <sup>ns</sup>   | 0,015 <sup>ns</sup>   | 0,003 <sup>ns</sup>   |
| 30                 | 0,00               | 0,01               | 0,03               | 0,00               | 0,012 <sup>ns</sup>       | 0,008 <sup>ns</sup>   | 0,004 <sup>ns</sup>   | 0,005 <sup>ns</sup>   |
| 40                 | 0,01               | 0,03               | 0,01               | 0,00               | 0,008 <sup>ns</sup>       | 0,003 <sup>ns</sup>   | 0,011 <sup>ns</sup>   | 0,009 <sup>ns</sup>   |
| 50                 | 0,01               | 0,08               | 0,10               | 0,00               | 0,013 <sup>ns</sup>       | 0,011 <sup>ns</sup>   | 0,004 <sup>ns</sup>   | 0,007 <sup>ns</sup>   |
| 60                 | 0,03               | 0,08               | 0,02               | 0,00               | 0,006 <sup>ns</sup>       | 0,003 <sup>ns</sup>   | 0,002 <sup>ns</sup>   | 0,007 <sup>ns</sup>   |
| 70                 | 0,05               | 0,00               | 0,02               | 0,00               | 0,002 <sup>ns</sup>       | 0,004 <sup>ns</sup>   | 0,007 <sup>ns</sup>   | 0,005 <sup>ns</sup>   |
| 80                 | 0,00               | 0,01               | 0,05               | 0,02               | 0,000 <sup>ns</sup>       | 0,000 <sup>ns</sup>   | 0,000 <sup>ns</sup>   | 0,000 <sup>ns</sup>   |
| $\sum \chi^2$      | 0,11 <sup>ns</sup> | 0,21 <sup>ns</sup> | 0,25 <sup>ns</sup> | 0,03 <sup>ns</sup> | $Dif_{max} = 0,03439$     | $Dif_{max} = 0,03488$ | $Dif_{max} = 0,03519$ | $Dif_{max} = 0,03518$ |

A dinâmica observada da área basal em cada classe de diâmetro foi acompanhada pelo simulador proposto, visto que as tendências de queda e de crescimento na área basal foram atendidas na maioria dos intervalos avaliados. Isto mostra que a simulação não apenas gerou resultados precisos, como também demonstrou a movimentação ao longo do tempo com exatidão (Figura 2).

O modelo estimou com alta precisão a área basal em todas as classes de diâmetro e a dinâmica observada para o parâmetro foi descrita pelo modelo proposto (Figura 2), corroborando com os resultados dos testes de aderência.

A intensidade da dinâmica nas classes de diâmetro inferiores faz com que os modelos tenham maior dificuldade em acompanhar os dados observados, problema que já foi identificado na modelagem com os métodos Cadeia de Markov e Razão de Movimentação (EBLING et al, 2012). Tal fato mostra a importância dos resultados obtidos.

A dinâmica de sistemas tem foco nas mudanças (FORRESTER, 1961). Desta forma, os acompanhamentos das mudanças da área basal por classe de diâmetro mostram que o modelo proposto teve aderência.

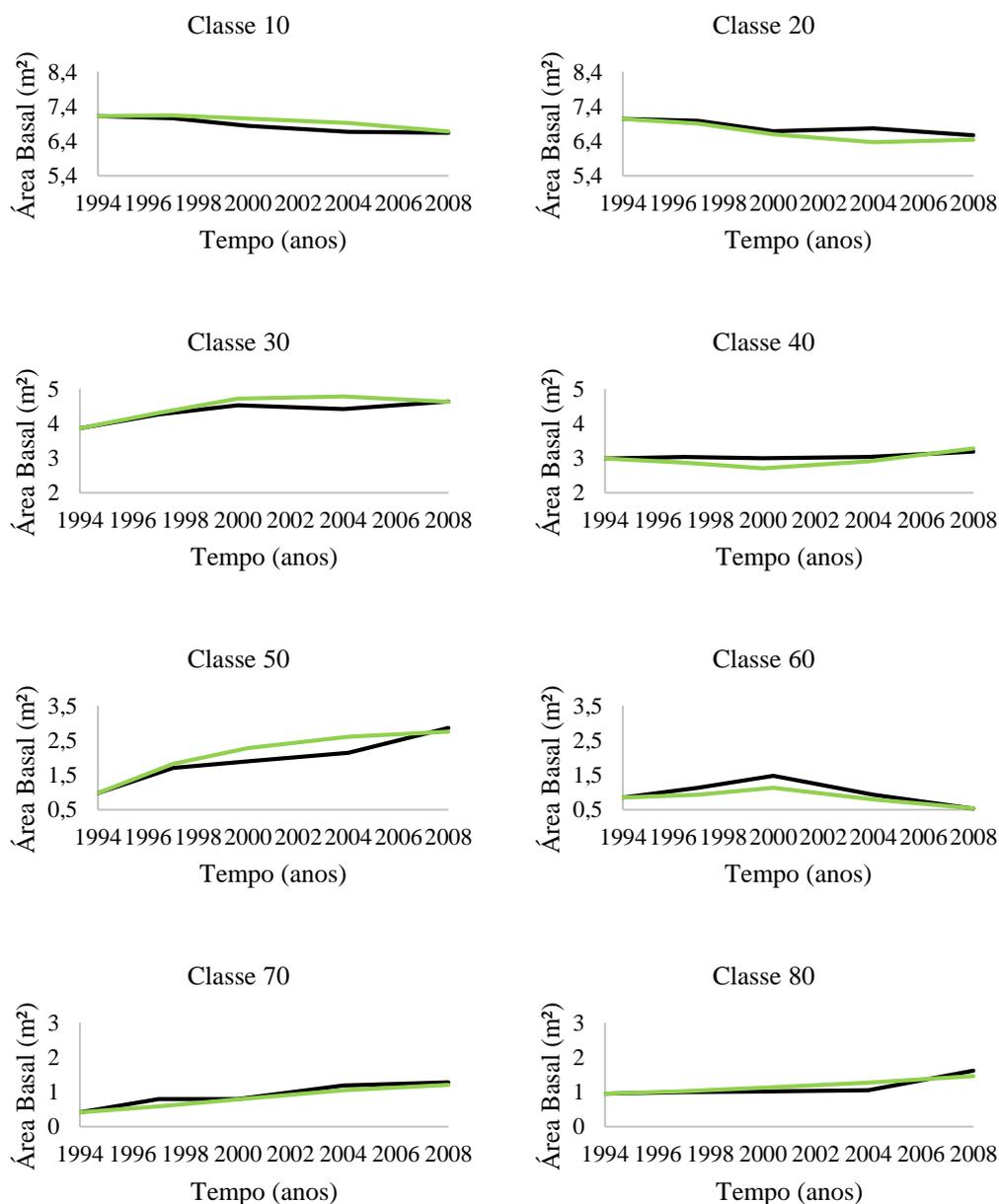


Figura 2 – Dinâmica observada (linha preta) e simulada (linha verde) área basal em cada classe diamétrica nos anos de 1994, 1997, 2000, 2004 e 2008, em uma Floresta Estacional Semidecidual na região de Viçosa, MG.

### 3.1.2. Ingresso e mortalidade

As estatísticas de precisão da simulação realizada demonstram que o ingresso foi subestimado, enquanto a mortalidade na floresta foi superestimada no período avaliado (Tabela 3).

Tabela 3 – Estatísticas de precisão da simulação para os parâmetros mortalidade e ingresso, nos anos de 1997, 2000, 2004 e 2008, em uma Floresta Estacional Semidecidual na região de Viçosa, MG.

| Variável    | Correlação | MDA   |
|-------------|------------|-------|
| Mortalidade | 0,362      | 0,119 |
| Ingresso    | 0,501      | 0,035 |

O coeficiente de correlação do ingresso pode ser considerado satisfatório. O modelo de árvore média de Lynch e Moser (1986) subestima em até 47% o número de árvores que ingressaram na menor classe de diâmetro, valor muito superior à subestimação encontrada neste simulador, que foi de 10% em função da área basal ingressante na menor classe de diâmetro. No modelo SYMFOR, os submodelos de ingresso e mortalidade foram considerados fracos (PHILLIPS, 2004), evidenciando as dificuldades em se conseguir para estes parâmetros resultados com a mesma qualidade que a modelagem do crescimento apresenta.

A tendência observada do ingresso foi quase que integralmente acompanhada pelo modelo dinâmico (Figura 3), sendo que no período entre 2004 e 2008 o ingresso foi subestimado. Já a área basal mostrou-se quase que plenamente modelada, visto que apenas no ano de 2004 houve pequena subestimação do parâmetro em questão.

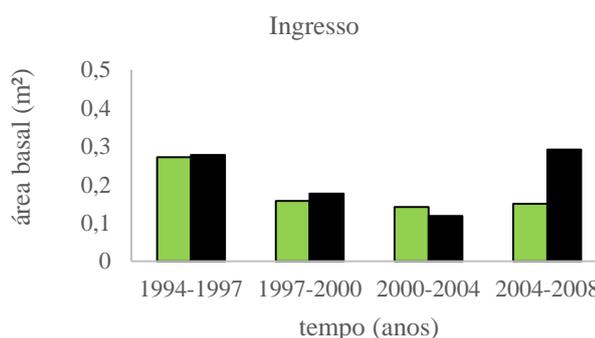


Figura 3 – Gráficos de ingresso observado (em preto) e simulado (em verde), nos anos de 1994, 1997, 2000, 2004 e 2008, em uma Floresta Estacional Semidecidual na região de Viçosa, MG.

Os valores observados e simulados para a mortalidade (Figura 4) demonstram que nas 3 primeiras classes de diâmetro, em que as taxas de mortalidade variavam de acordo com as características da própria floresta, as tendências observadas foram acompanhadas integralmente. Porém, nestas 3 classes, houve maior erro na mortalidade no período entre 1997 e 2000. Nas outras classes avaliadas, o comportamento dos dados simulados de representar a média do período entre 1994 e 2008 já era esperado, visto que a mortalidade foi calculada com uma taxa média do período em estudo.

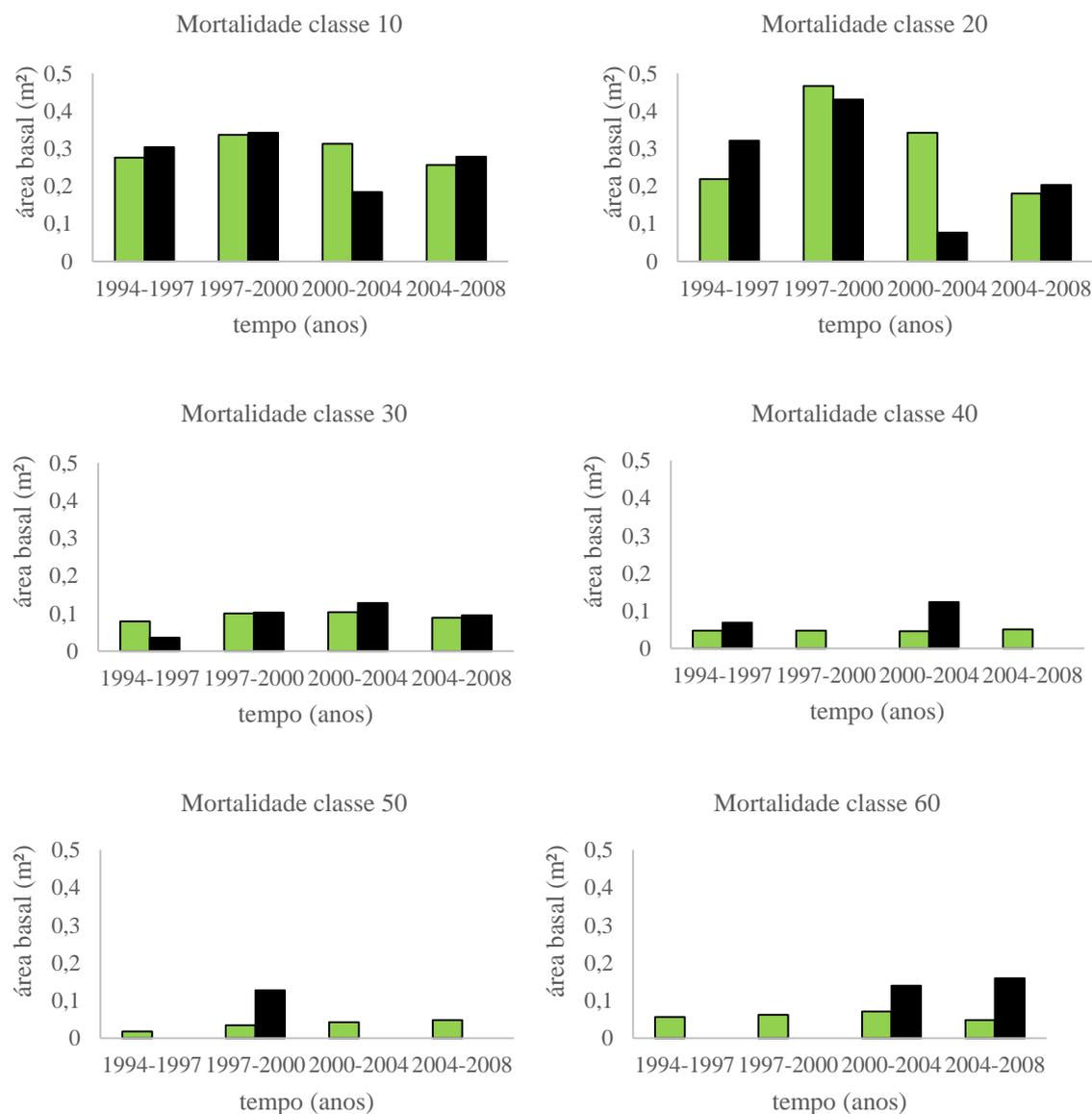


Figura 4 – Gráficos de mortalidade observada (em preto) e simulada (em verde), nos anos de 1994, 1997, 2000, 2004 e 2008, em uma Floresta a Estacional Semidecidual na região de Viçosa, MG.

A dinâmica de sistemas tem como um de seus objetivos o aprendizado a respeito da dinâmica de determinado evento, bem como o entendimento das relações responsáveis pelos diversos efeitos observados (WOLSTENHOLME, 1999).

A sensibilidade apresentada pelo simulador em gerar mudanças baseadas nos parâmetros da própria floresta, aliada à sua precisão em prever os diversos eventos, responsáveis pela dinâmica florestal, fazem com que o simulador proposto seja uma alternativa viável para auxiliar na tomada de decisão acerca de tratamento silvicultural, bem como do ciclo de corte a ser adotado. Além disso pode auxiliar na tomada de decisão a respeito da intensidade de exploração. Tudo isto corrobora com a interpretação analítica de fenômenos com base em simulações (XU; LI, 2011).

O modelo apresentado constitui um laboratório em que se pode fazer experimentos, verificando a influência que determinadas mudanças em alguma variável de interesse gera na dinâmica da floresta. Afinal, prescrições silviculturais incorretas podem trazer efeitos negativos sobre a ecologia de uma floresta e a obtenção de tratamentos adequados se utilizando de experimentos em florestas reais pode ter como consequência a danificação da mesma.

A simulação de tratamentos silviculturais por meio da dinâmica de sistemas pode ser realizada de duas formas distintas: com mudanças empíricas nos níveis das variáveis de estoque do modelo, que são as áreas basais por classe de diâmetro, e com o uso de funções do software Vensim. A função PULSE, por exemplo, permite variar os níveis das variáveis de estoque em intervalos de tempo de interesse do manejador. Algumas alterações no modelo conceitual também podem ser feitas para que métodos como o BDq (MEYER, 1952) sejam simulados pelo modelo proposto.

### **3.2. Validação**

A área basal por classe de diâmetro simulada para 2012 não diferiu estatisticamente da observada, ao nível de 5% de significância (Tabela 4). Tal fato mostra a capacidade de generalização do modelo proposto.

Tabela 4 – Aderência da área basal por classe de diâmetro simulada à observada em 2012, pelos testes Qui-quadrado e Komolgorov -Smirnov, em uma Floresta Estacional Semidecidual na região de Viçosa, MG.

| Classe de Diâmetro | B observada | B simulada | $\chi^2$           | $ Dif_{obs} - Dif_{sim} $ |
|--------------------|-------------|------------|--------------------|---------------------------|
| $5 \leq dap < 15$  | 6,477       | 6,537      | 0,00               | 0,0069 <sup>ns</sup>      |
| $15 \leq dap < 25$ | 6,443       | 6,529      | 0,00               | 0,0147 <sup>ns</sup>      |
| $25 \leq dap < 35$ | 4,511       | 4,486      | 0,00               | 0,0170 <sup>ns</sup>      |
| $35 \leq dap < 45$ | 3,208       | 3,654      | 0,06               | 0,0356 <sup>ns</sup>      |
| $45 \leq dap < 55$ | 3,119       | 2,928      | 0,01               | 0,0309 <sup>ns</sup>      |
| $55 \leq dap < 65$ | 0,833       | 0,368      | 0,26               | 0,0145 <sup>ns</sup>      |
| $65 \leq dap < 75$ | 1,264       | 1,281      | 0,00               | 0,0161 <sup>ns</sup>      |
| $75 \leq dap$      | 2,149       | 1,665      | 0,11               | 0,0000 <sup>ns</sup>      |
|                    |             |            | $\sum \chi^2=0,44$ | $Dif_{max}= 0,0362$       |

Os dados em questão foram simulados tendo a partir de 1994. Desta forma, os erros da simulação se propagaram até 2012, perfazendo 18 anos. Mesmo assim, a distribuição da área basal por classe de diâmetro foi estimada com sucesso em 2012, ano em que os dados observados não foram utilizados para gerar as tendências necessárias à parametrização do simulador. O simulador conseguiu descrever a dinâmica da área basal da floresta no período avaliado (Figura 5).

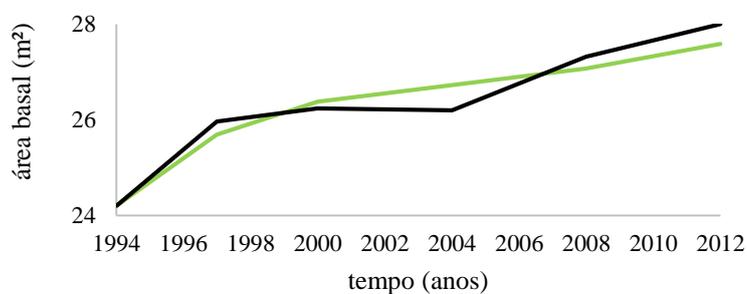


Figura 5 – Área basal observada (linha preta) e simulada (linha verde), nos anos de 1994, 1997, 2000, 2004, 2008 e 2012, em uma Floresta Estacional Semidecidual na região de Viçosa, MG.

A dinâmica de sistemas tem como limitação o fato de não ser baseada em princípios estatísticos (BUONGIORNO, 1996). Entretanto, da mesma forma que os modelos estatísticos, a dinâmica de sistemas para fins de predição pode ser usada, desde que a exatidão do modelo seja satisfatória (FORRESTER, 1980).

Outro ponto positivo da validação é a exatidão do simulador na estimação da área basal nas menores classes diamétricas. Afinal, os métodos mais estudados para projeção da estrutura diamétrica atualmente têm maiores erros nestas classes de diâmetro (EBLING et al, 2012).

A qualidade do modelo em simular a área basal ao longo do tempo pode ser atestada quando o mesmo é comparado a outros modelos já testados. Ao utilizar o modelo SYMFOR para modelar a dinâmica florestal na Amazônia, Azevedo et al. (2008) encontraram erros proporcionalmente maiores na dinâmica da área basal do tratamento testemunha, em que não foram feitas intervenções na floresta.

Como ponto a ser melhorado, cabe ressaltar as dificuldades que o modelo teve na simulação da área basal nas classes de diâmetro superiores, quando comparado às classes inferiores. Uma hipótese para explicar tal dificuldade seria que nestas classes de diâmetro os processos responsáveis por descrever a dinâmica são controlados por taxas constantes. Soma-se a isso, os baixos valores da área basal nestas classes, em que erros proporcionalmente grandes não teriam tanta influência nas primeiras classes diamétricas, que apresentam maior área basal.

Machado et al. (2015) usou a dinâmica de sistemas para modelar os estoques de madeira e carbono em florestas equiâneas. Tal sucesso foi atribuído à capacidade da ferramenta em estudar sistemas de grande complexidade, permitindo no modelo a inclusão de variáveis tradicionalmente não incluídas nos modelos mais usuais, como por exemplo as variáveis de fluxo sofrendo alterações ao longo do tempo, concordando com Stave (2002). O uso de variáveis ambientais pode resultar em maior exatidão e, ao mesmo tempo, entender como as mudanças climáticas podem influenciar na dinâmica florestal.

#### **4. CONCLUSÕES**

Diante do que foi discutido anteriormente, conclui-se:

- A dinâmica de sistemas descreveu de forma apropriada a dinâmica da distribuição diamétrica;
- O modelo proposto pode ser utilizado para fins de projeção da distribuição por classe de diâmetro de florestas inequiâneas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

AZEVEDO, C. P.; SANQUETTA, C. R.; SILVA, J. N. M.; MACHADO, S. A.; SOUZA, C. R.; OLIVEIRA, M. M. Simulação de estratégias de manejo florestal na Amazônia com o uso do modelo SYMFOR. **Acta Amazônica**, v. 38, n. 1, p. 51-70, 2008.

BRASIL. Serviço Florestal Brasileiro. Florestas do Brasil em resumo 2013. Disponível em: < <http://www.florestal.gov.br/publicacoes/tecnico-cientifico/florestasdo-brasil-em-resumo-2013>>. Acesso em 18 de abr de 2015.

BUONGIORNO, J. Forest sector modeling: a synthesis of econometrics, mathematical programming, and system dynamics methods. **International Journal of Forecasting**, v. 12, p. 329-343, 1996.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2013. 605 p.

CORREA, G. F. **Modelo de evolução e mineralogia da fração de argila de solos de planalto de Viçosa-mg**. 1984. 187f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1984.

EBLING, A.A.; WATZLAWICK, L.F.; RODRIGUES, A.L.; LONGHI, S.J.; LONGHI, R.V.; ABRÃO, S.F. Acuracidade da distribuição diamétrica entre métodos de projeção em Floresta Ombrófila Mista. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, n.6, p.1020-1026, 2012.

FIGUEIREDO, L.T.M.; SOARES, C.P.B.; SOUZA, A.L.; MARTINS, S.V. Alterações florísticas em uma Floresta Estacional Semidecidual, no município de Viçosa, MG, entre 1994 e 2008. **Floresta**, v.43, p.169-180, 2013.

FORRESTER, J.W. **Study notes in System Dynamics** The MIT Press, Cambridge, 1961.

FORRESTER, J.W. Information sources for modeling the national economy. **Journal of the American Statistical Association**, v.75, n. 371, p. 555–566, 1980

HIGUCHI, N.; SANTOS, J. dos; SILVA, R. P. da; LIMA, A. N.; TEIXEIRA, L. M.; CARNEIRO, V. M. C.; FELSEMBURGH, C. A.; TRIBUZY, E. S. **Noções básicas sobre manejo florestal**. 2008. 270 p. Grupo de pesquisas em manejo florestal/INPA. (Apostila).

HOSOKAWA, R. T.; MOURA, J. B. de; CUNHA, U. S. da; **Introdução ao manejo e economia de florestas**. Curitiba: UFPR, 2008. 164 p.

HUTH, A.; DITZER, T. Long-term impacts of logging in a tropical rain forest - a simulation study. **Forest Ecology and Management**, v. 142, p.33-51, 2001.

LYNCH, T. B.; MOSER, J. R., J. W. A growth model for mixed species stands. **Forest Science**, Bethesda, v. 32, n. 3, p. 697-706, 1986.

MACHADO, R. R.; CONCEIÇÃO, S. V.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; WOLFF, E. Evaluation of forest growth and carbon stock in forestry projects by system dynamics. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, n. 1, p.520-530, 2015.

MEYER, H. A. Structure, growth, and drain in balanced uneven-aged forests. **Journal of Forestry**, v. 50, n. 2, p. 85-92, 1952.

OLIVEIRA JUNIOR, J. C.; DIAS, H. C. T. Precipitação efetiva em fragmento secundário da Mata Atlântica. **Revista Árvore**, v. 29, n. 1, jan./fev., p. 9-15, 2005.

PHILLIPS, P. D.; AZEVEDO, C. P.; DEGEN, B.; THOMPSON, I. S.; SILVA, J. N. M.; VAN GARDINGEN, P. R. An individual-based spatially explicit simulation model for strategic forest management planning in the eastern Amazon. **Ecological Modelling**, v. 173, n. 4, p. 335–354, 2004.

PINTO, L. C.; LIMA, P. T.; JUNIOR, J. J. S. Probabilistic models for estimation extreme values of watershed flow rates. **Revista Agrogeoambiental**, v. 7, n. 1, p. 105-112, 2015.

PREACHER, K. J. **Calculation for the chi-square test: An interactive calculation tool for chi-square tests of goodness of fit and independence** [Computer software]. 2001.

SANQUETA, C. R. ARAUSIS: Sistema de simulação para manejo sustentável de florestas de Araucária. **Floresta**, v. 29, n. 12, p. 115-121, 1999.

SOS MATA ATLÂNTICA. **Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica**. 2012. Disponível em: < [https://www.sosma.org.br/link/atlas2011-12/ATLAS\\_apresentacao\\_2011\\_2012\\_COLETIVA.pdf](https://www.sosma.org.br/link/atlas2011-12/ATLAS_apresentacao_2011_2012_COLETIVA.pdf)>. Acesso em: 01jun. 2016.

SOUZA, A. L.; SOARES, C. P. B. **Florestas Nativas – Estrutura, Dinâmica e Manejo**. 1. ed. Viçosa, UFV, 2013. 322 p.

STAVE, K. A. Using system dynamics to improve public participation in environmental decisions. **Syst. Dynam. Rev.**, v. 18, n. 2, p.139-167.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield**: applications to mixed tropical forests. Waallingford: CAB International, 1994. 312 p.

WOLSTENHOLME, E.F. Qualitative vs. quantitative modeling: the evolving balance. **Journal of Operational Research Society**, v. 50, p. 422 – 428, 1999.

XU, J.; LI, X. Using system dynamics for simulation and optimization of one coal industry system under fussy environment. **Exp. Syst. Appl.**, v. 38, n. 9, p. 11552-11559, 2011.

## ANEXO I

Equações do modelo calibrado.

- (01)  $as\ 10 = \text{INTEG}(\text{Ingresso-m } 10 \text{ a } 20 - \text{"Mort. } 10\text{"} + (\text{TXC } 10 * as\ 10), 7.12814)$
- (02)  $as\ 30 = \text{INTEG}(m\ 20 \text{ a } 30 - m\ 30 \text{ a } 40 - \text{"Mort. } 30\text{"} + as\ 30 * \text{TXC } 30 + m\ 20 \text{ a } 30 * \text{TXCMud } 20 \text{ a } 30, 3.86037)$
- (03)  $as\ 40 = \text{INTEG}(m\ 30 \text{ a } 40 - m\ 40 \text{ a } 50 - \text{"Mort. } 40\text{"} + as\ 40 * \text{TXC } 40 + m\ 30 \text{ a } 40 * \text{TXCMud } 30 \text{ a } 40, 2.98876)$
- (04)  $as\ 50 = \text{INTEG}(m\ 40 \text{ a } 50 - m\ 50 \text{ a } 60 - \text{"Mort. } 50\text{"} + as\ 50 * \text{TXC } 50 + m\ 40 \text{ a } 50 * \text{TXCMud } 40 \text{ a } 50, 0.97589)$
- (05)  $as\ 60 = \text{INTEG}(m\ 50 \text{ a } 60 - m\ 60 \text{ a } 70 - \text{"Mort. } 60\text{"} + as\ 60 * \text{TXC } 60 + m\ 50 \text{ a } 60 * \text{TXCMud } 50 \text{ a } 60, 0.853222)$
- (06)  $as\ 70 = \text{INTEG}(m\ 60 \text{ a } 70 - m\ 70 \text{ a } 80 - \text{"Mort. } 70\text{"} + as\ 70 * \text{TXC } 70 + m\ 60 \text{ a } 70 * \text{TXCMud } 60 \text{ a } 70, 0.410055)$
- (07)  $as\ 80 = \text{INTEG}(m\ 70 \text{ a } 80 - \text{"Mort. } 80\text{"} + as\ 80 * \text{TXC } 80 + m\ 70 \text{ a } 80 * \text{TXCMud } 70 \text{ a } 80, 0.948563)$
- (08)  $as20 = \text{INTEG}(m\ 10 \text{ a } 20 - m\ 20 \text{ a } 30 - \text{"Mort. } 20\text{"} + \text{TXC } 20 * as20 + m\ 10 \text{ a } 20 * \text{TXCMud } 10 \text{ a } 20, 7.03863)$
- (09)  $ASC = as\ 10 + as\ 30 + as20$
- (10)  $b = as\ 10 + as\ 30 + as\ 40 + as\ 50 + as\ 60 + as\ 70 + as\ 80 + as20$
- (11)  $\text{Ingresso} = \exp(100.099 - 7.62709 * \text{LN}(b) - 10.5147 * \text{LN}(N))$
- (12)  $m\ 10 \text{ a } 20 = as\ 10 * \text{TMud } 10 \text{ a } 20$
- (13)  $m\ 20 \text{ a } 30 = as20 * \text{TMud } 20 \text{ a } 30$
- (14)  $m\ 30 \text{ a } 40 = as\ 30 * \text{TMud } 30 \text{ a } 40$
- (15)  $m\ 40 \text{ a } 50 = \text{TMud } 40 \text{ a } 50 * as\ 40$
- (16)  $m\ 50 \text{ a } 60 = as\ 50 * \text{TMud } 50 \text{ a } 60$
- (17)  $m\ 60 \text{ a } 70 = as\ 60 * \text{TMud } 60 \text{ a } 70$
- (18)  $m\ 70 \text{ a } 80 = as\ 70 * \text{TMud } 70 \text{ a } 80$
- (19)  $\text{"Mort. } 10\text{"} = as\ 10 * \text{TMort } 10$
- (20)  $\text{"Mort. } 20\text{"} = as20 * \text{TMort } 20$
- (21)  $\text{"Mort. } 30\text{"} = as\ 30 * \text{TMort } 30$
- (22)  $\text{"Mort. } 40\text{"} = as\ 40 * \text{TMort } 40$
- (23)  $\text{"Mort. } 60\text{"} = as\ 60 * \text{TMort } 60$
- (24)  $\text{"Mort. } 70\text{"} = as\ 70 * \text{TMort } 70$
- (25)  $\text{"Mort. } 80\text{"} = as\ 80 * \text{TMort } 80$
- (26)  $\text{"Mort. } 50\text{"} = as\ 50 * \text{TMort } 50$
- (27)  $N = N\ 10 + N\ 20 + N\ 30 + N\ 40 + N\ 50 + N\ 60 + N\ 70 + N\ 80$
- (28)  $N\ 10 = 136.231 + 149.529 * as\ 10$
- (29)  $N\ 20 = 50.0475 + 26.3023 * as20$
- (30)  $N\ 30 = -21.0692 + 20.1947 * as\ 30$
- (31)  $N\ 40 = -7.75159 + 10.5517 * as\ 40$
- (32)  $N\ 50 = -0.0950021 + 5.26507 * as\ 50$
- (33)  $N\ 60 = 0.211336 + 3.23489 * as\ 60$
- (34)  $N\ 70 = 0.0634431 + 2.39069 * as\ 70$
- (35)  $N\ 80 = 0.390276 + 1.60924 * as\ 80$
- (36)  $\text{TMort } 10 = -0.00197233 / (1 - 1.70287 * \exp(-0.0267731 * (ASC)))$
- (37)  $\text{TMort } 20 = -0.0138797 / (1 - 31652 * \exp(-0.554364 * (ASC)))$
- (38)  $\text{TMort } 30 = 2.00249 / (1 + 432866 * \exp(-0.466104 * ASC))$
- (39)  $\text{TMort } 40 = 0.016066$
- (40)  $\text{TMort } 50 = 0.0186919$

- (41) TMort 60=0.0661213
- (42) TMort 70=0
- (43) TMort 80=0
- (44) TMud 10 a 20=0.0487777\*exp(-exp(-46.29-1.74101\*(-b)))
- (45) TMud 20 a 30=0.0674851\*exp(-exp(-69.4422-2.63636\*(-b)))
- (46) TMud 30 a 40=891905\*exp(-exp(2.19336-0.0243038\*(-b)))
- (47) TMud 40 a 50=0.183956\*exp(-exp(-64.5711-2.45996\*(-b)))
- (48) TMud 50 a 60=0.124079\*exp(-exp(-154.995-5.92708\*(-b)))
- (49) TMud 60 a 70=0.126933
- (50) TMud 70 a 80=0.0425249
- (51) TXC 10=0.0571088\*exp(-exp(-96.9899-3.64743\*(-b)))
- (52) TXC 20=0.0415938\*exp(-exp(-25.7518-0.93758\*(-b)))
- (53) TXC 30=0.0291915\*exp(-exp(3-1\*b))
- (54) TXC 40=0.226481\*exp(-exp(1.41518-0.0267658\*b))
- (55) TXC 50=2.45394e+010\*exp(-exp(3.98166-0.0254132\*b))
- (56) TXC 60=0.018494
- (57) TXC 70=0.0113019
- (58) TXC 80=0.0334377
- (59) TXCMud 10 a 20=0.411919\*exp(-exp(-190.828-7.28045\*(-b)))
- (60) TXCMud 20 a 30=0.234027\*exp(-exp(-54.5675-2.06198\*(-b)))
- (61) TXCMud 30 a 40=8.16386\*exp(-exp(-2.11393-0.13199\*(-b)))
- (62) TXCMud 40 a 50=0.408321\*exp(-exp(-54.2814-2.07998\*(-b)))
- (63) TXCMud 50 a 60=0.382322\*exp(-exp(-1752.54-66.9156\*(-b)))
- (64) TXCMud 60 a 70=0.222284
- (65) TXCMud 70 a 80=0.0353934

## CAPITULO III

### **Dinâmica do estoque de biomassa e carbono total em uma Floresta Estacional Semidecidual: uma aplicação da Dinâmica de Sistemas**

#### **RESUMO**

O crescente aumento das emissões antrópicas dos gases do efeito estufa faz com que as florestas, como sumidouros de carbono, tenham importante papel. Afinal, as mesmas podem atuar na neutralização das emissões antrópicas de carbono. Por isso, este trabalho modelou a dinâmica do estoque de carbono e biomassa totais das árvores de uma Floresta Estacional Semidecidual por meio da dinâmica de sistemas. A área em estudo é um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, onde foram instaladas e medidas 10 parcelas permanentes nos anos de 1994, 1997, 2000, 2004, 2008 e 2012, totalizando 6 medições, sendo que as 5 primeiras foram utilizadas para parametrizar o modelo proposto. Para avaliar a qualidade das estimativas utilizou-se o Índice de Correlação e a Média das diferenças Absolutas, além da análise gráfica dos dados observados e simulados. As correlações entre o estoque de carbono e biomassa totais simulados e observados entre 1994 e 2012 foram de aproximadamente 92%. Já as Médias das Diferenças Absolutas dos estoques de biomassa e carbono total foram de 1,377 t e 0,668 t, respectivamente. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, quando comparados a outros trabalhos. Assim, conclui-se que a dinâmica de sistemas foi capaz de explicar a dinâmica do estoque de carbono total e, o modelo proposto representa uma ferramenta útil no auxílio ao estabelecimento de metas para remoção de carbono por parte das florestas, um dos sumidouros de carbono existentes no planeta.

#### **1. INTRODUÇÃO**

As mudanças climáticas são uma realidade no planeta Terra. A temperatura global teve aumento de aproximadamente 0,85 °C entre 1880 e 2012, e provavelmente as atividades humanas contribuíram para este quadro (IPCC, 2014). Tal fato reforça a preocupação com a crescente concentração dos gases causadores do efeito estufa. São previstos aumentos na temperatura mundial entre 0,3 °C a 4,8 °C, até 2100, dependendo das emissões de gases do efeito estufa (IPCC, 2014). Tal fenômeno poderá causar impactos ambientais (WALTHER et al., 2002) e socioeconômicos (PARRY et al., 2003).

Devido a esse fato, são crescentes as preocupações e os esforços em reduzir a concentração de gases do efeito estufa na atmosfera.

As florestas têm um papel fundamental na mitigação desse gás (GRACE et al., 2014). Cobrindo cerca de 25% da superfície terrestre (GIBSON et al., 2011; PIMM et al., 2014), por meio da fotossíntese, elas utilizam o dióxido de carbono para a geração biomassa (LITTON et al., 2007; GONZALEZ BENECKE et al., 2010).

Mesmo com toda importância, as florestas têm sido ameaçadas em todo mundo. Uma destas ameaças é o desflorestamento (FAO, 2014). Embora a taxa global de desmatamento tenha caído nos últimos anos, alguns locais específicos ainda têm números elevados (FAO, 2014). Além do desflorestamento, a degradação das florestas também influencia na ciclagem de carbono. Processos como a exploração (TICKTIN, 2004), fragmentação (LAURENCE et al., 2011) e as próprias mudanças climáticas têm causado impactos negativos sobre as florestas nativas.

Com tudo isso, as florestas inequívocas têm tido importante papel nas emissões de gases do efeito estufa, em especial nos países em desenvolvimento. No Brasil por exemplo, a maior parte das emissões de gases de efeito estufa já foi consequência direta do desmatamento (BRASIL, 2004; BRASIL 2013).

A redução das emissões de gases do efeito estufa do desmatamento e da degradação tem tido atenção especial, com mecanismo próprio de pagamento por este serviço ambiental, que é o REDD (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation) (GUAZOUL et al., 2010). Por meio deste mecanismo, os proprietários das florestas inequívocas recebem remuneração financeira por protegê-las. Durante a COP 15, este mecanismo foi aprimorado, com a inclusão da conservação, do manejo florestal e o incremento dos estoques de carbono nas florestas no REDD, passando a ser reconhecido como REDD+ (CENAMO et al., 2010). Em função do importante papel que a agricultura tem tido para o desmatamento em diversos países, como o Brasil (FERREIRA; COELHO, 2015), o REDD+ foi aprimorado para incorporar práticas sustentáveis também na agricultura, visando a diminuição do desmatamento causado pela atividade. Assim, o REDD+ passou a ser conhecido como REDD++.

Desta forma, é importante a realização de estudos sobre estoque de carbono em formações florestais (SILVEIRA et al., 2008). Embora alguns trabalhos tenham se dedicado ao estudo da predição do estoque de carbono (SILVA et al., 2008; GATTO, 2011), a maioria dos estudos quantificou o estoque de carbono em apenas um momento específico (AMARO, 2010; BRITZ et al., 2006; TORRES et al., 2013).

O estudo da dinâmica de carbono em fragmentos de Mata Atlântica é incipiente. Figueiredo et al. (2015), estudando a dinâmica do carbono entre 1994 e 2008, encontraram que a floresta apresenta um incremento periódico anual de 0,994 ton.ha<sup>-1</sup>. No entanto, a modelagem desta dinâmica, bem como as melhores ferramentas para realização desta são ainda menos estudadas.

Machado et al. (2015) utilizaram da dinâmica de sistemas para avaliar o estoque de carbono em plantios florestais, concluindo que tal método pode servir de base para quantificação de créditos de carbono em florestas equiâneas. Os mesmos autores afirmaram ainda que a dinâmica de sistemas é apropriada para estudos de crescimento em florestas, em função da habilidade da técnica em ambientes de grande complexidade.

Diante deste cenário, este estudo teve por objetivo simular as mudanças dos estoques de biomassa e carbono em uma Floresta Estacional Semidecidual ao longo do tempo, na região de Viçosa, Minas Gerais, pelo emprego da dinâmica de sistemas.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1.Dados**

Os dados utilizados neste trabalho foram provenientes de parcelas permanentes instaladas em uma Floresta Estacional Semidecidual Montana em estágio médio para avançado de regeneração (FIGUEIREDO et al., 2013), com coordenadas 20°45'S e 42°51'W, no município de Viçosa (MG), Brasil.

A região tem, com latossolos nos topos e encostas e argissolos nos terraços, apresenta topografia acidentada, com altitude desde 600 m podendo chegar até 970 m (CORREA, 1984). O clima é do tipo Cwa segundo a classificação de Köppen, com verões chuvosos e invernos secos (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual é de aproximadamente 1300 mm (OLIVEIRA JUNIOR; DIAS, 2005).

O inventário florestal do fragmento consistiu na medição de 10 parcelas permanentes retangulares, com dimensões 20 m x 50 m, totalizando área igual a 0,1 ha. Elas foram mensuradas nos anos de 1994, 1997, 2000, 2004, 2008 e 2012. Em cada medição, as árvores com *dap* ≥ 5 cm foram identificadas ao nível de espécie, tiveram suas alturas total e do fuste estimadas com um hipsômetro Vertex, e seu *dap* medido.

Os cálculos da biomassa e carbono total das árvores foi realizado seguindo o seguinte procedimento:

- 1- Obtenção da biomassa do fuste das árvores, por meio de uma equação ajustada por Amaro (2010):

$$BFcc = 0,03343dap^{2,397902}hf^{0,426536} \quad (1)$$

$$\bar{R}^2 = 95,63 \% \quad S_{y,x} = \pm 22,6\%$$

Em que  $BFcc$  é biomassa no fuste (em kg);  $dap$  é diâmetro medido a 1,30 m de altura (em cm) e  $hf$  é altura do fuste (em m).

2- Obtenção da biomassa dos galhos ( $BGcc$ ), estimada de acordo com Amaro (2010):

$$BGcc = 0,2596BFcc \quad (2)$$

3- Cálculo da biomassa estocada nas folhas ( $BFO$ ), estimada com base no estudo de Drumond (1996):

$$BFO = 0,0445BFcc \quad (3)$$

4- Estimativa da biomassa em raízes ( $BR$ ) conforme recomendação de Golley et al. (1978), citado por (TORRES et al, 2013):

$$BR = 0,24BFcc \quad (4)$$

5- Contabilização da biomassa total ( $BT$ ):

$$BT = BFcc + BGcc + BFO + BR \quad (5)$$

6- Cálculo do carbono total estocado ( $CE$ ) nas árvores, de acordo com Amaro (2010):

$$CE = 0,4854BT \quad (6)$$

## 2.2. Dinâmica de sistemas

As mudanças nos estoques de biomassa e carbono foram trabalhadas por meio de uma modificação do modelo dinâmico que estima a área basal por classe diamétrica da floresta. Este modelo considera o fluxo de área basal entre as classes de diâmetro, sendo que o sentido deste fluxo ocorre de uma classe diamétrica  $x$  para uma classe diamétrica superior.

A dinâmica da distribuição de área basal por classe diamétrica foi modelada em função do ingresso de novas árvores na primeira classe diamétrica, da mortalidade, que ocorre em todas as classes de tamanho, e do crescimento, que pode ter como consequência a mudança da classe diamétrica das árvores.

No modelo em questão as árvores foram separadas em 8 classes diamétricas de 10 cm de amplitude, sendo que o  $dap$  mínimo de inclusão foi de 5 cm. Na última classe incluem-se todas as árvores com  $dap$  mínimo de 75 cm. A área basal de cada classe avaliada é descrita por meio de equações diferenciais, sendo que na primeira classe tem-se que:

$$\frac{das_{10t}}{dt} = ing - TMort.10(as_{10t-1}) - TMud.10 a 20 (as_{10t-1}) + TXC10(as_{10t-1}) \quad (7)$$

Em que:  $as_{10}$  é a área basal da classe com árvores de  $5 \text{ cm} \leq dap < 15 \text{ cm}$  (em  $\text{m}^2$ );  $ing$  é a área basal das árvores que ingressaram (em  $\text{m}^2$ );  $t$  é o tempo (em anos);  $TMort.10$  é a taxa de mortalidade da primeira classe diamétrica;  $TMud.10 a 20$  é a taxa de mudança para a segunda classe diamétrica e  $TXC10$  é a taxa de crescimento das árvores que permaneceram na classe em questão.

Da segunda à penúltima classe diamétrica não ocorre o processo de ingresso, sendo o mesmo substituído pela mudança de árvores da classe anterior para a classe sob análise:

$$\frac{dasx_t}{dt} = TMud.x1 a x (asx_{1t-1}) + TXCMud x1 a x(TMud.x1 a x (asx_{1t-1})) - TMort.x(asx_{t-1}) - TMud.x a x2 (asx_{t-1}) + TXCx(asx_{t-1}) \quad (8)$$

Em que:  $asx_1$  é a área basal da classe diamétrica de tamanho imediatamente inferior à avaliada (em  $\text{m}^2$ );  $TMud..x1 a x$  é a área basal das árvores que mudaram da classe inferior para a classe avaliada (em  $\text{m}^2$ );  $TXCMud x1 a x$  é a taxa de crescimento da área basal que mudou da classe diamétrica inferior para a atual;  $t$  é o tempo (em anos);  $TMort.x$  é a taxa de mortalidade da classe diamétrica avaliada;  $TMud.x a x2$  é a taxa de mudança para a classe diamétrica superior e  $TXCx$  é a taxa de crescimento das árvores que não saíram da classe de diâmetro avaliada.

A dinâmica na última classe de diâmetro ocorre em função da migração de árvores da penúltima classe e da mortalidade, não havendo a migração das árvores para uma classe diamétrica superior. A dinâmica foi expressa por:

$$\frac{das_t}{dt} = TMud.70 a 80 (as_{70t-1}) + TXCMud 70 a 80(TMud.70 a 80 (as_{70t-1})) - TMort.80(as_{t-1}) + TXC80(as_{t-1}) \quad (9)$$

Em que:  $as_{70}$  é a área basal das árvores na penúltima classe de diâmetro (em  $\text{m}^2$ );  $TMud.70 a 80$  é a área basal das árvores que mudaram da penúltima para a última classe (em  $\text{m}^2$ );  $TXCMud 70 a 80$  é a taxa de crescimento da área basal que mudou da penúltima para a última classe;  $t$  é o tempo (em anos);  $TMort.80$  é a taxa de mortalidade da classe diamétrica em questão e;  $TXC80$  é a taxa de crescimento das árvores que não morreram.

No diagrama de fluxo as relações explicitadas acima podem ser vistas de forma mais evidente (Figura 1), sendo que as siglas presentes no mesmo têm seu significado na Tabela 1.

Tabela 1 – Significado das siglas presentes na Figura 1.

| Sigla           | Significado                                                                    | Unidade         |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| as i            | Somatório das áreas basais das árvores na classe i                             | m <sup>2</sup>  |
| <as i>          | Variável sombra para as i                                                      | m <sup>2</sup>  |
| TMort i         | Taxa de mortalidade na área basal que permaneceu na classe i                   | t <sup>-1</sup> |
| TXC i           | Taxa de crescimento na área basal que permaneceu na classe i                   | t <sup>-1</sup> |
| TMud i a i+10   | Taxa de mudança na área basal entre as classes i e classe superior             | t <sup>-1</sup> |
| TXCMud i a i+10 | Taxa de crescimento na área basal que mudou da classe i para a classe superior | t <sup>-1</sup> |
| Mort. I         | Área basal morta na classe i                                                   | m <sup>2</sup>  |
| Mud i+10        | Área basal que mudou da classe i para a classe superior                        | m <sup>2</sup>  |
| ASC             | Somatório das áreas basais das classes as 10, as 20 e as 30                    | m <sup>2</sup>  |
| N i             | Número de árvores da classe i por hectare                                      | Árvores/ha      |
| D               | Densidade total                                                                | Árvores/ha      |
| I               | Centro de diâmetro da classe, que compreende $i-5 \leq i < i+5$                | cm              |

\*Obs: variável sombra é a representação da variável de interesse em outro local em um mesmo diagrama, com a finalidade organizacional.

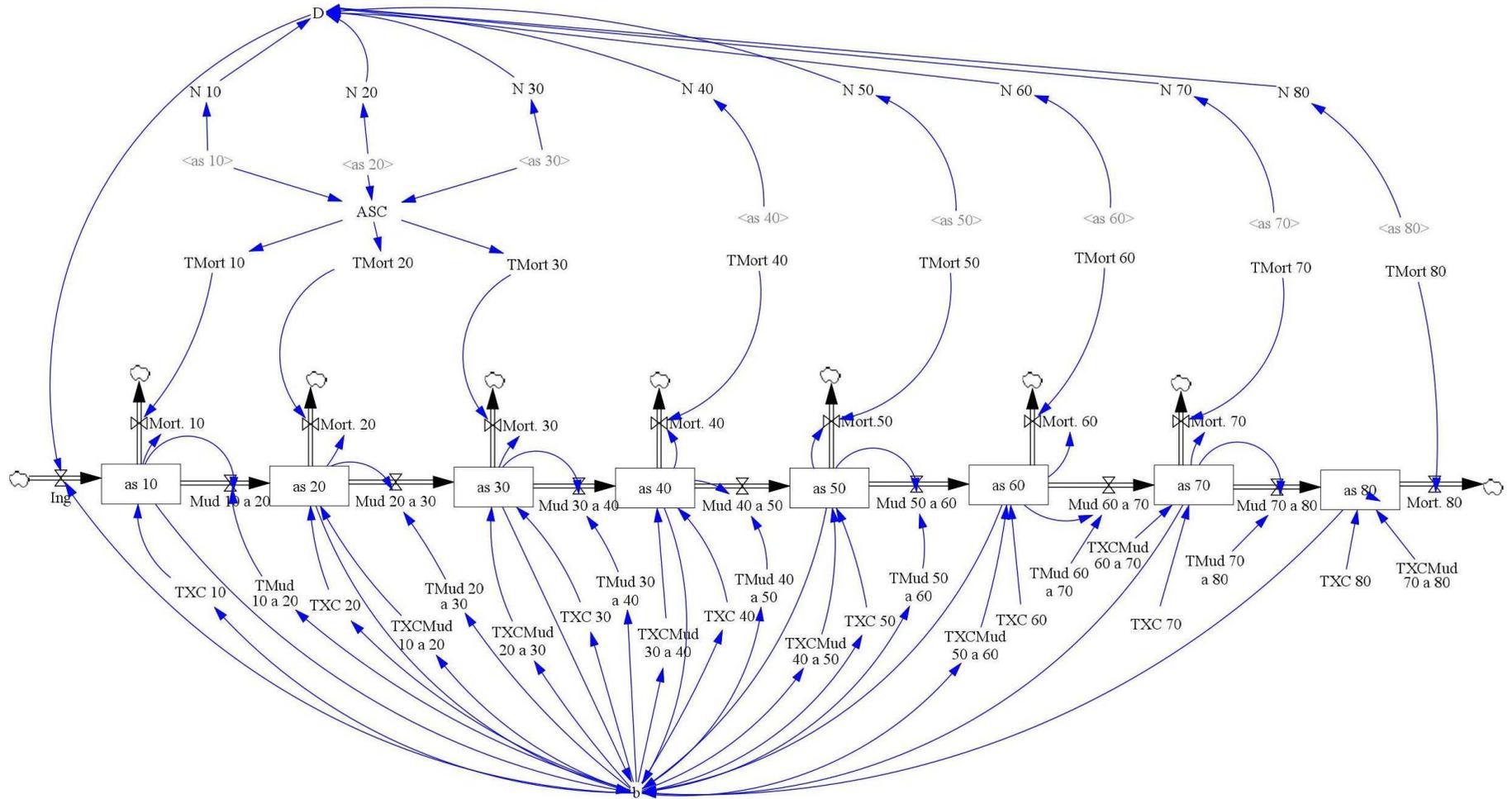


Figura 1 – Diagrama de fluxo representando as relações causais envolvidas na dinâmica da distribuição diamétrica em uma floresta.

Para se modelar a dinâmica da biomassa e carbono totais das árvores, acrescentou-se ao modelo acima as variáveis biomassa e carbono estocado por classe diamétrica, sendo as mesmas calculadas em função da área basal da própria classe (Figura 2).

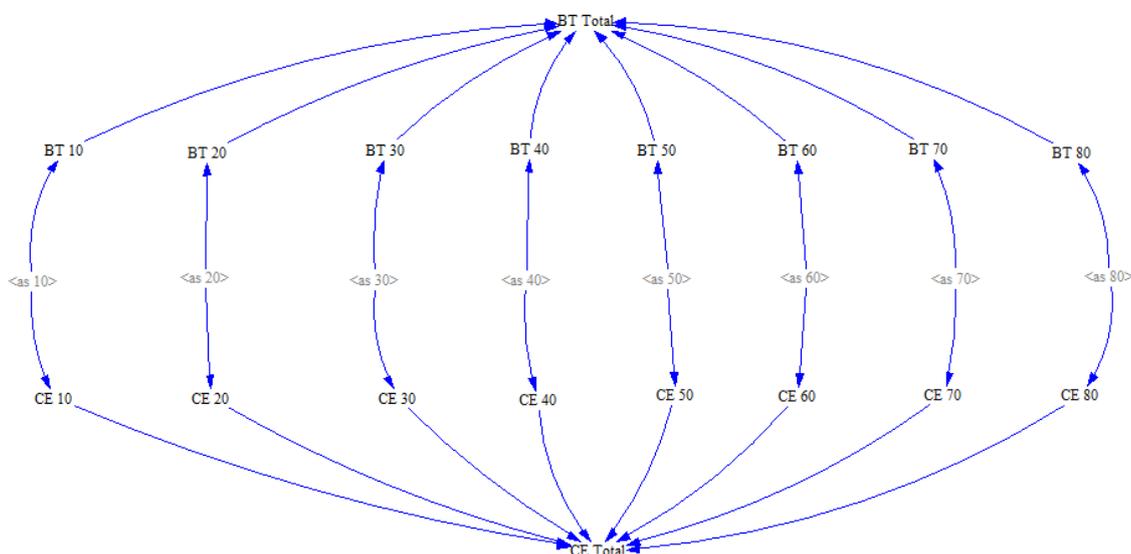


Figura 2 – Diagrama causal representando as relações causais envolvidas na dinâmica dos estoques de biomassa (BT) e carbono (CE) totais em uma floresta.

Para a calibração do modelo no que tange ao estoque de biomassa e carbono totais, utilizou-se os dados referentes aos anos de 1994, 1997, 2000, 2004 e 2008 para o ajuste de equações que descrevem a tendência das variáveis de interesse em função da área basal (Tabela 2).

Tabela 2 – Equações que descrevem a tendência do carbono (CE) e biomassa (BT) estocados em função da área basal.

| Classe de diâmetro | Biomassa total                      | Carbono total                       |
|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| $5 \leq dap < 15$  | $BT\ 10 = 6412,52 + 2867,87as\ 10$  | $CE\ 10 = 3112,63 + 1392,07as\ 10$  |
| $15 \leq dap < 25$ | $BT\ 20 = 27329,7 + 2162,18as\ 20$  | $CE\ 20 = 13265,8 + 1049,52as\ 20$  |
| $25 \leq dap < 35$ | $BT\ 30 = -5497,86 + 8894,45as\ 30$ | $CE\ 30 = -2668,66 + 4317,37as\ 30$ |
| $35 \leq dap < 45$ | $BT\ 40 = -9567,4 + 12250,5as\ 40$  | $CE\ 40 = -4644,02 + 5946,42as\ 40$ |
| $45 \leq dap < 55$ | $BT\ 50 = -1817,39 + 11070,3as\ 50$ | $CE\ 50 = -882,16 + 5373,51as\ 50$  |
| $55 \leq dap < 65$ | $BT\ 60 = 1543,23 + 9007,9as\ 60$   | $CE\ 60 = 749,09 + 4372,44as\ 60$   |

Continua...

| Classe de diâmetro | Biomassa total                       | Continuação da tabela 2              |
|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| $65 \leq dap < 75$ | $BT\ 70 = 2183,81 + 9006,06as\ 70$   | Carbono total                        |
| $dap \geq 75$      | $BT\ 80 = -1808,62 + 14039,3as\ 80$  | $CE\ 70 = 1060,02 + 4371,54as\ 70$   |
| Total              | $BT\ Total = \sum_{x=10}^{80} BT\ x$ | $CE\ 80 = -877,90 + 6814,66as\ 80$   |
|                    |                                      | $CE\ Total = \sum_{x=10}^{80} CE\ x$ |

As outras relações do modelo podem ser visualizadas no anexo I.

### 2.3. Avaliação do modelo

O modelo proposto foi avaliado por meio das seguintes estatísticas:

- Coeficiente de correlação:

$$r_{\hat{Y}Y} = \frac{n^{-1}(\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)(Y_i - \bar{Y}))}{\sqrt{(n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)^2)(n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2)}}$$

Em que  $R_{\hat{Y}Y}$  é o Coeficiente de Correlação entre o carbono estocado no fuste observado ( $Y_i$ ) e simulados ( $\hat{Y}_i$ );  $\hat{Y}_m$  é a média dos valores de carbono estocado no fuste simulados;  $\bar{Y}$  é a média aritmética dos valores observados de carbono total estocado e  $n$  é o número de observações.

- Média das diferenças absolutas (MDA):

$$MDA = n^{-1} \sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i|$$

Em que  $MDA$  é a média das diferenças absolutas de carbono estocado no fuste,  $\hat{Y}_i$  e  $Y_i$  são, respectivamente, os valores simulados e observados de carbono estocado no fuste e  $n$  é o número de observações.

Além das estatísticas acima, fez-se a análise gráfica do carbono total estocado para o fragmento.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os estoques totais de biomassa e carbono simulados e observados entre 1997 e 2012 tiveram correlação de 92,4 % (Tabela 3). A média absoluta das diferenças foram de

1,377 e 0,668 ton para a biomassa e o carbono, respectivamente, valores que representam menos de 1% das médias observadas para estes parâmetros.

Tabela 3 – Estatísticas de precisão da simulação para os parâmetros biomassa e carbono totais, nos anos de 1997, 2000, 2004 e 2008, em uma Floresta Estacional Semidecidual na região de Viçosa, MG.

| Parâmetro | Correlação (%) | MDA (t) |
|-----------|----------------|---------|
| Biomassa  | 92,4005        | 1,377   |
| Carbono   | 92,3999        | 0,668   |

A acentuada tendência de aumento verificada nos dados observados entre 1994 e 2012 foi descrita pelo sistema. Assim, o uso do modelo para projeções dos estoques totais de biomassa e carbono pode ser aconselhado.

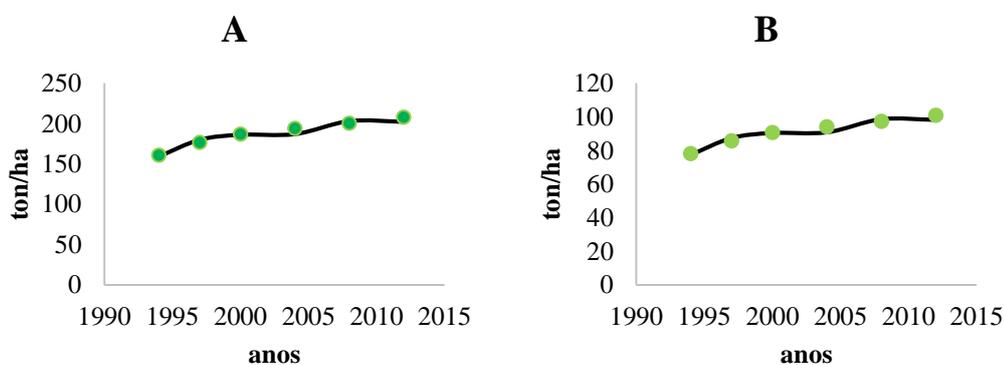


Figura 3 – Dinâmica observada (linha contínua preta) e simulada (marcador verde) dos estoques totais de biomassa (A) e carbono (B) nos anos de 1994, 1997, 2000, 2004, 2008 e 2012, em uma Floresta Estacional Semidecidual na região de Viçosa, MG.

As correlações encontradas neste trabalho podem ser consideradas altas. Em trabalho realizado com o objetivo de prever o estoque de carbono no fuste de plantios de eucalipto na região de Guanhães, MG, encontrou-se correlação de aproximadamente 99% (SILVA et al., 2008), valor superior ao deste trabalho. Entretanto, cabe ressaltar que o trabalho citado foi realizado em plantios, que tem por característica apresentar menor variação que em florestas inequiduais.

Em outro trabalho, dedicado a predição do carbono estocado no fuste de plantios de eucalipto, Gatto et al. (2011) encontrou correlações entre 94 e 99%, dependendo da região, valores pouco superiores aos encontrados neste trabalho.

A eficiência do modelo em simular o estoque de carbono faz com que a abordagem de dinâmica de sistemas possa ser utilizada para quantificação de créditos de carbono, concordando com Machado et al. (2015). Afinal, o potencial de armazenamento de carbono das florestas nativas ainda não é totalmente conhecido (HOOVER et al., 2012). Atualmente a redução das emissões por desmatamento e degradação têm sido reconhecidas financeiramente (GHAZOUL et al., 2010), aumentando ainda mais a importância do modelo proposto.

Em trabalho verificando o sequestro de carbono em áreas restauradas, em diferentes instantes do tempo, Wang et al. (2016) encontrou que o sequestro de carbono variou na medida em que se mudava o tempo em que a área foi restaurada. Tais resultados indicam que florestas nos diferentes estágios sucessionais podem apresentar distintos comportamentos no que tange à estocagem de carbono.

Para quantificar os créditos de carbono na região de Viçosa, Ribeiro et al. (2011) utilizou incrementos médio em carbono equivalente de 7,43 tCO<sub>2(eq)</sub> e 4,04 tCO<sub>2(eq)</sub>, para florestas secundária e primária, respectivamente. Neste caso, o modelo proposto pode ser utilizado para gerar estimativas de sequestro de carbono específicas para a área de interesse, substituindo os incrementos médios. Pode-se também distribuir o sequestro de carbono de forma mais exata ao longo do tempo, ao invés de se utilizar de valores médios de incremento em carbono. Esta possibilidade teria efeitos até mesmo na formação do fluxo de caixa do projeto de créditos de carbono, uma vez que as receitas seriam distribuídas ao longo do horizonte de planejamento do projeto, e não concentradas no início do projeto, conforme o realizado por Ribeiro et al. (2011).

O aumento do CO<sub>2</sub> na atmosfera é atribuído, em grande parte, ao uso de combustíveis fósseis e ao desmatamento. Assim, a manutenção das florestas inequívocas tem papel fundamental na redução das emissões de gases do efeito estufa. Estima-se que entre 1750 e 2011 foram lançados 2040 Gt de CO<sub>2</sub> na atmosfera em consequência das atividades antrópicas (IPCC, 2014). A Mata Atlântica pode atuar como um sumidouro de carbono, mitigando assim essas emissões. O modelo proposto pode servir como base para a verificação dessa estocagem ao longo do tempo.

Em função desta importância, o manejo florestal é uma estratégia válida para evitar o desmatamento, e assim evitar as emissões de gases que o efeito estufa em função

desta atividade (MILLER et al., 2011). Corroborando com este fato, florestas manejadas assimilam mais carbono que as florestas não manejadas (SEIDL et al., 2007; PUTZ et al., 2008; WEST et al., 2014). Ao mesmo tempo, florestas manejadas emitem menos carbono para a atmosfera (PUTZ et al., 2008).

Tendo conhecimento sobre a importância do manejo florestal, como forma de evitar os desmatamentos e impulsionar o sequestro de carbono pelas florestas, o mesmo poderia ser até mesmo reconhecido como um instrumento capaz de auxiliar a Política Nacional sobre Mudança do Clima a cumprir seus objetivos. Dentre eles o fortalecimento do sequestro de gases de efeito estufa emitidos como resultados das ações antrópicas (BRASIL, 2009). Neste contexto, o presente trabalho propõe uma alternativa capaz de auxiliar no estabelecimento de metas para remoção das emissões antrópicas de gases de efeito estufa, conforme o instrumento XVII da Política Nacional sobre Mudança do Clima (BRASIL, 2009), através da projeção dos estoques de carbono das florestas inequívocas por meio do modelo proposto. Ao mesmo tempo, contribui para a formulação de projetos de neutralização de emissões antrópicas de gases do efeito estufa.

O modelo proposto é uma ferramenta para combater as mudanças climáticas, que têm diversos efeitos sobre: a biodiversidade (MARENGO, 2007), recursos hídricos (MARENGO, 2008), o zoneamento de culturas agrícolas como o café (ASSAD et al., 2004) e comportamento de pragas e doenças (BEBER et al., 2013). Com efeito, este trabalho pode ajudar na mitigação de impactos sobre a produção e os preços de mercado dos produtos (LENNON, 2015).

Diante da eficiência do modelo, propõe-se ainda a utilização do mesmo como forma de verificar o impacto da exploração florestal sobre a dinâmica do carbono, bem como na escolha de melhores alternativas de manejo para maximização do sequestro de carbono por parte da floresta.

#### **4. CONCLUSÕES**

A dinâmica de sistemas é eficiente na simulação da dinâmica dos estoques de biomassa e carbono totais das árvores em uma Floresta Estacional Semidecidual. O modelo proposto pode ser utilizado com eficiência como subsídio à valoração financeira da redução das emissões por desmatamento e degradação, bem como na elaboração de metas de sequestro de carbono para compensação das emissões antrópicas, previstas na política nacional sobre mudança do clima.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

AMARO, M. A. **Quantificação do estoque volumétrico, de biomassa e de carbono em uma Floresta Estacional Semidecidual no município de Viçosa, MG**. 2010. 168 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JUNIOR, J.; ÁVILA, A. M. H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, 2004.

BEBBER, D. P.; RAMOTOWSKI, M. A. T.; GURR, S. J. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. **Nature Climate Change**, v. 3, p. 985-988, 2013.

BRASIL, MCT. **Brazil's Initial National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), Brasília, DF, Brasil. 271 p. 2004.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. **Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências**. Brasília, 29 de dezembro de 2009.

BRASIL, MCTI. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), Brasília, DF, Brasil. 80 p. 2013.

BRITEZ, R. M.; BORGIO, M.; TIEPOLO, G.; FERRETTI, A.; CALMON, M.; HIGA, R. **Estoque e incremento de carbono em florestas e povoamentos de espécies arbóreas com ênfase na Floresta Atlântica do Sul do Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2006. 165 p.

CENAMO, M. C. et al. **Guia sobre Projetos REDD+ na América Latina**. Manaus: 2010. 96p.

CORREA, G. F. **Modelo de evolução e mineralogia da fração de argila de solos de planalto de Viçosa-mg**. 1984. 187f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1984.

DRUMOND, M. A. **Alterações fitossociológicas e edáficas decorrentes de modificações da cobertura vegetal na Mata Atlântica, região do Médio Rio Doce, MG**. 1996. 73f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1996.

FERREIRA, M. D. P.; COELHO, A. B. Desmatamento Recente nos Estados da Amazônia Legal: uma análise da contribuição dos preços agrícolas e das políticas governamentais. **Ver. Econ. Sociol. Rural**, v. 53, n. 1, p. 93-108, 2015.

FIGUEIREDO, L.T.M.; SOARES, C.P.B.; SOUZA, A.L.; MARTINS, S.V. Alterações florísticas em uma Floresta Estacional Semidecidual, no município de Viçosa, MG, entre 1994 e 2008. **Floresta**, v.43, p.169-180, 2013.

FIGUEIREDO, L. T. M.; SOARES, C. P. B.; SOUZA, A. L.; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. Dinâmica do estoque de carbono em fuste de árvores de uma Floresta Estacional Semidecidual. **Cerne**, v. 21, n. 1, p. 161-167, 2015.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **State of the World's Forests**. Roma, 2014. 121 f.

GATTO, A.; BARROS, N. F. de; NOVAIS; R. F. de; SILVA, I. R. da; LEITE, H. G.; VILLANI, E. M. A. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região centro-leste do estado de minas gerais. **Rev. Árvore**, v. 35, n. 4, p. 895-905, 2011.

GHAZOUL, J. et al. REDD: a reckoning of environment and development implications. **Trends in Ecology and Evolution**, v.25, n.7, p.396-402, 2010.

GIBSON, L.; LEE, T.M.; KOH, L.P.; BROOK, B.W.; GARDNER, T.A.; BARLOW, J.; PERES, C.A.; BRADSHAW, C.J.A.; LAURANCE, W.F.; LOVEJOY, T.E.; SODHI, N.S. Primary forests are irreplaceable for sustaining tropical biodiversity. **Nature**, v. 478, p. 378-381, 2011.

GOLLEY, F. B. et al. **Ciclagem de minerais em um ecossistema de Floresta Tropical Úmida**. São Paulo: EDUSP, 1978. 256p.

GONZALEZ-BENECKE, C.A.; MARTIN, T. A.; CROPPER JR., W. P.; BRACHO, R.. Forest management effects on in situ and ex situ slash pine forest carbon balance. **Forest Ecology Management**, v. 260, n. 5, p. 795-805, 2010.

GRACE, J.; MITCHARD, E.; GLOOR, E. Perturbations in the carbon budget of the tropics. **Global Change Biology**, v. 20, p. 3238–3255, 2014.

HOOVER, C. M.; LEAK, W. B.; KEEL, B. G. Benchmark carbon stocks from old-growth forests in northern New England, USA. **Forest ecology and Management**, Amsterdam, v. 266, p. 108-114, 2012.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC. **Climate change 2014: Synthesis report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014, 151 p.

LAURANCE, W.F.; CAMARGO, J.L.C.; LUIZAO, R.C.C.; LAURANCE, S.G.; PIMM, S.L.; BRUNA, E.M.; STOUFFER, P.C.; WILLIAMSON, G.B.; ITEZ-MALVIDO, J.; VASCONCELOS, H.L.; VAN HOUTAN, K.S.; ZARTMAN, C.E.; BOYLE, S.A.; DIDHAM, R.K.; ANDRADE, A.; LOVEJOY, T.E. The fate of Amazonian forest fragments: a 32-year investigation. **Biol. Conserv.**, v. 144, p. 56–67, 2011.

LENNON, J. J. Potential impacts of climate change on agriculture and food safety within the island of Ireland. **Trends in Food Science & Technology**, v. 44, n. 1, p. 1-10, 2015.

LITTON, C.; RAICH, J. W.; RYAN, M. G. Carbon allocation in forest ecosystems. **Global Change Biology**, v.13, n.10, p.2089-2109, 2007.

MACHADO, R.R.; CONCEIÇÃO, S.V.; LEITE, H.G.; SOUZA, A.L. WOLFF, E. Evaluation of forest growth and carbon stock in forestry projects by system dynamics. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p.520-530, 2015.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade; caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século 21**. 2 ed. Brasília: MMA, 2007. 163p.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 83-96, 2008.

MILLER, S. D.; GOULDEN, M. L.; HUTYRA, L. R.; KELLER, M.; SALESKA, S. R.; WOFSY, S. C.; FIGUEIRA, A. M. S.; ROCHA, H. R.; CAMARGO, P. B. Reduced impact logging minimally alters tropical rainforest carbon and energy exchange. **Proceedings of National Academic Sciences**, v. 108, n. 48, p. 19431-19435, 2011.

OLIVEIRA JUNIOR, J. C.; DIAS, H. C. T. Precipitação efetiva em fragmento secundário da Mata Atlântica. **Revista Árvore**, v. 29, n. 1, jan./fev., p. 9-15, 2005.

PARRY, M. L.; ROSENZWEIG, C.; IGLESIAS, A.; LIVERMORE, M.; FISCHER, G. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. **Global Environmental Change**, v. 14, n. 1, p. 53-67, 2003.

PIMM, S.L.; JENKINS, C.N.; ABELL, R.; BROOKS, T.M.; GITTLEMAN, J.L.; JOPPA, L.N.; RAVEN, P.H.; ROBERTS, C.M.; SEXTON, J.O. The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. **Science**, v. 344, p. 987-997, 2014.

PUTZ, F.E.; ZUIDEMA, P.A.; PINARD, M.A.; BOOT, R.G.A.; SAYER, J.A.; SHEIL, D.; SIST, P.; VANCLAY, J.K. Improved tropical forest management for carbon retention. **PLOS Biology**, v. 6, p. 1368–1369, 2008.

RIBEIRO, S. C.; JACOVINE, L. A. G.; SOARES, C. P. B.; SILVA, M. L.; NARDELLI, A. M. B.; SOUZA, A. L.; MARTINS, S. V. Análise econômica da implementação de projetos florestais para a geração de créditos de carbono em propriedades rurais na Mata Atlântica. **Scientia florestalis**, v.39, n. 89, p. 9-19, 2011.

SEIDL, R.; RAMMER, W.; JÄGER, D., CURRIE, W. S.; LEXER, M. J. Assessing trade-offs between carbon sequestration and timber production within a framework of multi-purpose forestry in Austria. **Forest Ecology and Management**, v. 248, n. (1-2), p. 64-79, 2007.

SILVA, R. F. da; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, A. G.; SILVA, M. L da; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. Projeção do estoque de carbono e análise da geração de créditos em povoamentos de eucalipto. **Rev. Árvore**, v. 32, n. 6, p. 979-992, 2008.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Rev. Floresta**, v. 38, n. 1, p. 185-206, 2008.

TICKTIN, T. The ecological implications of harvesting non-timber forest products. **J. Appl. Ecol.**,v. 41, p. 11–21, 2004.

TORRES, C. M. M. E.; JACOVINE, L. A. G.; SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA NETO, S. N.; SANTOS, R. D.; CASTRO NETO, F. Quantificação de biomassa e estocagem de carbono em uma floresta estacional semidecidual, no parque tecnológico de Viçosa, mg. **Rev. Árvore**, v. 37, n. 4, p. 647-655, 2013.

WALTHER, G. R.; POST, E.; CONVEY, P.; MENZEL, A.; PARMESAN, C.; BEEBEE, T. J. C.; FROMENTIN, J. M.; OVE, H. G.; BAIRLEIN, F. Ecological responses to recent climate change. **Nature**, v. 416, p. 389-395, 2002.

WANG K.; DENG L.; REN Z.; SHI W.; CHEN Y.; SHANG-GUAN Z. Dynamics of ecosystem carbon stocks during vegetation restoration on the Loess Plateau of China. **Journal of Arid Land**, v. 8, n. 2, p. 207–220, 2016.

WEST, T. A. P.; VIDAL, E.; PUTZ, F. E. Forest biomass recovery after conventional and reduced-impact logging in Amazonian Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 314, n. 15, p. 59-63, 2014.

## ANEXO I

Equações do modelo calibrado.

- (01)  $as\ 10 = \text{INTEG}(\text{Ingresso-m } 10 \text{ a } 20 - \text{"Mort. } 10\text{"} + (\text{TXC } 10 * as\ 10), 7.12814)$
- (02)  $as\ 30 = \text{INTEG}(m\ 20 \text{ a } 30 - m\ 30 \text{ a } 40 - \text{"Mort. } 30\text{"} + as\ 30 * \text{TXC } 30 + m\ 20 \text{ a } 30 * \text{TXCMud } 20 \text{ a } 30, 3.86037)$
- (03)  $as\ 40 = \text{INTEG}(m\ 30 \text{ a } 40 - m\ 40 \text{ a } 50 - \text{"Mort. } 40\text{"} + as\ 40 * \text{TXC } 40 + m\ 30 \text{ a } 40 * \text{TXCMud } 30 \text{ a } 40, 2.98876)$
- (04)  $as\ 50 = \text{INTEG}(m\ 40 \text{ a } 50 - m\ 50 \text{ a } 60 - \text{"Mort. } 50\text{"} + as\ 50 * \text{TXC } 50 + m\ 40 \text{ a } 50 * \text{TXCMud } 40 \text{ a } 50, 0.97589)$
- (05)  $as\ 60 = \text{INTEG}(m\ 50 \text{ a } 60 - m\ 60 \text{ a } 70 - \text{"Mort. } 60\text{"} + as\ 60 * \text{TXC } 60 + m\ 50 \text{ a } 60 * \text{TXCMud } 50 \text{ a } 60, 0.853222)$
- (06)  $as\ 70 = \text{INTEG}(m\ 60 \text{ a } 70 - m\ 70 \text{ a } 80 - \text{"Mort. } 70\text{"} + as\ 70 * \text{TXC } 70 + m\ 60 \text{ a } 70 * \text{TXCMud } 60 \text{ a } 70, 0.410055)$
- (07)  $as\ 80 = \text{INTEG}(m\ 70 \text{ a } 80 - \text{"Mort. } 80\text{"} + as\ 80 * \text{TXC } 80 + m\ 70 \text{ a } 80 * \text{TXCMud } 70 \text{ a } 80, 0.948563)$
- (08)  $as20 = \text{INTEG}(m\ 10 \text{ a } 20 - m\ 20 \text{ a } 30 - \text{"Mort. } 20\text{"} + \text{TXC } 20 * as20 + m\ 10 \text{ a } 20 * \text{TXCMud } 10 \text{ a } 20, 7.03863)$
- (09)  $ASC = as\ 10 + as\ 30 + as20$
- (10)  $b = as\ 10 + as\ 30 + as\ 40 + as\ 50 + as\ 60 + as\ 70 + as\ 80 + as20$
- (11)  $\text{Ingresso} = \exp(100.099 - 7.62709 * \text{LN}(b) - 10.5147 * \text{LN}(N))$
- (12)  $m\ 10 \text{ a } 20 = as\ 10 * \text{TMud } 10 \text{ a } 20$
- (13)  $m\ 20 \text{ a } 30 = as20 * \text{TMud } 20 \text{ a } 30$
- (14)  $m\ 30 \text{ a } 40 = as\ 30 * \text{TMud } 30 \text{ a } 40$
- (15)  $m\ 40 \text{ a } 50 = \text{TMud } 40 \text{ a } 50 * as\ 40$
- (16)  $m\ 50 \text{ a } 60 = as\ 50 * \text{TMud } 50 \text{ a } 60$
- (17)  $m\ 60 \text{ a } 70 = as\ 60 * \text{TMud } 60 \text{ a } 70$
- (18)  $m\ 70 \text{ a } 80 = as\ 70 * \text{TMud } 70 \text{ a } 80$
- (19)  $\text{"Mort. } 10\text{"} = as\ 10 * \text{TMort } 10$
- (20)  $\text{"Mort. } 20\text{"} = as20 * \text{TMort } 20$
- (21)  $\text{"Mort. } 30\text{"} = as\ 30 * \text{TMort } 30$
- (22)  $\text{"Mort. } 40\text{"} = as\ 40 * \text{TMort } 40$
- (23)  $\text{"Mort. } 60\text{"} = as\ 60 * \text{TMort } 60$
- (24)  $\text{"Mort. } 70\text{"} = as\ 70 * \text{TMort } 70$
- (25)  $\text{"Mort. } 80\text{"} = as\ 80 * \text{TMort } 80$
- (26)  $\text{"Mort. } 50\text{"} = as\ 50 * \text{TMort } 50$
- (27)  $N = N\ 10 + N\ 20 + N\ 30 + N\ 40 + N\ 50 + N\ 60 + N\ 70 + N\ 80$
- (28)  $N\ 10 = 136.231 + 149.529 * as\ 10$
- (29)  $N\ 20 = 50.0475 + 26.3023 * as20$
- (30)  $N\ 30 = -21.0692 + 20.1947 * as\ 30$
- (31)  $N\ 40 = -7.75159 + 10.5517 * as\ 40$
- (32)  $N\ 50 = -0.0950021 + 5.26507 * as\ 50$
- (33)  $N\ 60 = 0.211336 + 3.23489 * as\ 60$
- (34)  $N\ 70 = 0.0634431 + 2.39069 * as\ 70$
- (35)  $N\ 80 = 0.390276 + 1.60924 * as\ 80$
- (36)  $\text{TMort } 10 = -0.00197233 / (1 - 1.70287 * \exp(-0.0267731 * (ASC)))$
- (37)  $\text{TMort } 20 = -0.0138797 / (1 - 31652 * \exp(-0.554364 * (ASC)))$
- (38)  $\text{TMort } 30 = 2.00249 / (1 + 432866 * \exp(-0.466104 * ASC))$
- (39)  $\text{TMort } 40 = 0.016066$
- (40)  $\text{TMort } 50 = 0.0186919$

- (41) TMort 60=0.0661213
- (42) TMort 70=0
- (43) TMort 80=0
- (44) TMud 10 a 20=0.0487777\*exp(-exp(-46.29-1.74101\*(-b)))
- (45) TMud 20 a 30=0.0674851\*exp(-exp(-69.4422-2.63636\*(-b)))
- (46) TMud 30 a 40=891905\*exp(-exp(2.19336-0.0243038\*(-b)))
- (47) TMud 40 a 50=0.183956\*exp(-exp(-64.5711-2.45996\*(-b)))
- (48) TMud 50 a 60=0.124079\*exp(-exp(-154.995-5.92708\*(-b)))
- (49) TMud 60 a 70=0.126933
- (50) TMud 70 a 80=0.0425249
- (51) TXC 10=0.0571088\*exp(-exp(-96.9899-3.64743\*(-b)))
- (52) TXC 20=0.0415938\*exp(-exp(-25.7518-0.93758\*(-b)))
- (53) TXC 30=0.0291915\*exp(-exp(3-1\*b))
- (54) TXC 40=0.226481\*exp(-exp(1.41518-0.0267658\*b))
- (55) TXC 50=2.45394e+010\*exp(-exp(3.98166-0.0254132\*b))
- (56) TXC 60=0.018494
- (57) TXC 70=0.0113019
- (58) TXC 80=0.0334377
- (59) TXCMud 10 a 20=0.411919\*exp(-exp(-190.828-7.28045\*(-b)))
- (60) TXCMud 20 a 30=0.234027\*exp(-exp(-54.5675-2.06198\*(-b)))
- (61) TXCMud 30 a 40=8.16386\*exp(-exp(-2.11393-0.13199\*(-b)))
- (62) TXCMud 40 a 50=0.408321\*exp(-exp(-54.2814-2.07998\*(-b)))
- (63) TXCMud 50 a 60=0.382322\*exp(-exp(-1752.54-66.9156\*(-b)))
- (64) TXCMud 60 a 70=0.222284
- (65) TXCMud 70 a 80=0.0353934

## CONCLUSÕES GERAIS

No capítulo 1, concluiu-se o diagrama de fluxo representou os processos relacionados a dinâmica florestal.

No capítulo 2, diante dos resultados concluiu-se que o modelo proposto e devidamente parametrizado pode ser utilizado para fins de projeção e simulação de tratamentos silviculturais para a área em questão.

No capítulo 3, verificou-se que dinâmica de sistemas foi eficiente na predição da dinâmica dos estoques de biomassa e carbono totais das árvores em uma Floresta Estacional Semidecidual.