

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**MODELAGEM POR SISTEMAS DINÂMICOS DA
DECOMPOSIÇÃO DE SERRAPILHEIRA NA
FLORESTA DE TRANSIÇÃO EM SINOP - MT**

VITOR BACCARIN ZANETTI

**PROF. DR. CARLO RALPH DE MUSIS
ORIENTADOR**

CUIABÁ, MT, ABRIL- 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**MODELAGEM POR SISTEMAS DINÂMICOS DA
DECOMPOSIÇÃO DE SERRAPILHEIRA NA
FLORESTA DE TRANSIÇÃO EM SINOP - MT**

VITOR BACCARIN ZANETTI

*Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Física
Ambiental da Universidade Federal de
Mato Grosso, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em
Física Ambiental.*

PROF. DR. CARLO RALPH DE MUSIS

ORIENTADOR

CUIABÁ, MT, ABRIL - 2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

Folha de Aprovação

**TÍTULO: MODELAGEM POR SISTEMAS DINÂMICOS DA
DECOMPOSIÇÃO DE SERRAPILHEIRA NA FLORESTA DE TRANSIÇÃO EM
SINOP, MATO GROSSO.**

AUTOR: VITOR BACCARIN ZANETTI

Dissertação defendida e aprovada em ___ de _____ de 2009, pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Carlo Ralph De Musis

Orientador

Universidade de Cuiabá

Prof. Dr. Francisco de Almeida Lobo

Avaliador Interno

Universidade Federal do Mato Grosso

Prof. Dr. Nicolau Priante Filho

Avaliador Externo

Universidade Federal do Mato Grosso

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e meu irmão, pela paciência e compreensão, aos meus avós pelo apoio, e a Deus pela vida e pelas oportunidades

AGRADECIMENTOS

- A Deus pela vida e pelas oportunidades que me foram apresentadas ao longo dela, e ao catolicismo pela força espiritual tão necessária para a superação de mais essa etapa da minha vida.
- Aos meus pais Carlos Antonio Zanetti e Regina Aparecida Baccarin Zanetti, pela paciência e compreensão em todos os momentos durante essa etapa. E ao meu irmão Vinicius Baccarin Zanetti pelo companheirismo durante esses anos.
- A toda minha família, que apesar da ausência física estavam sempre comigo em orações e pensamento.
- Em especial ao meu orientador Carlo Ralph De Muisis, por acreditar em minha capacidade quando outros duvidaram e por orientar-me com paciência, compreensão e acima de tudo amizade durante esses dois anos.
- Ao Grupo de Pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental do Departamento de Física/ICET/UFMT pela realização dos vários trabalhos, vinculados a essa dissertação.
- Aos amigos de todas as partes pelas horas de distração e diversão proporcionados, em especial a “Turma do QG”, pelas muitas reuniões e diversões que vivemos juntos, espero muito mais venha por aí.
- Ao Dr. Marcelo Sacardi Biudes, pelo companheirismo e amizade, e pela parceria nas muitas viagens ao Pantanal, onde tive a chance de aprender muito sobre o meio ambiente e suas particularidades.
- Ao Professor Dr. Francisco de Almeida Lobo, pela paciência, ajuda e companheirismo.
- Ao grande amigo de pós-graduação Segundo Durval Rezende por ter acreditado que o nosso trabalho poderia vir a dar frutos.
- Ao amigo e parceiro de orientação Marcelo Paes de Barros, pelas tantas ajudas durante esse trabalho.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
RESUMO	iii
1 Introdução	1
1.1 Problemática	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivos	3
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 Serrapilheira	4
2.2 Modelagem de Sistemas Dinâmicos	9
2.3 Bootstrap	15
3 Material e Métodos	19
3.1 Área de Estudo	19
3.2 Modelagem	20
3.2.1 Desenho do Modelo	20
3.2.2 Coleta de Dados	21
3.2.3 Pesquisa do Ponto Crítico	23
3.2.4 Intervalos de Confiança <i>Bootstrap</i>	24
4 Resultados e Discussão	25
5 Conclusões	33
6 Considerações finais	34
7 Referências bibliográficas	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição normal do estimador transformado, com seu intervalo de confiança (MANLY, 2007, pp.47).	17
Figura 2 - Localização da área da área de pesquisa.....	19
Figura 3 - Fluxograma do processo de modelagem por sistemas dinâmicos	10
Figura 4 - Diagrama de Fluxos	11
Figura 5 - Fluxograma de trabalho da modelagem.....	20
Figura 6 - Modelo matemático de simulação da serrapilheira.....	21
Figura 7 - Caixa coletora de serrapilheira de 1m ² utilizada para coleta de serrapilheira produzida.	22
Figura 8 - Coletor em molde vazado de 0,25 m x 0,25 m utilizado para coleta de serrapilheira acumulada.	23
Figura 9 - Gráfico dos escores de serrapilheira acumulada simulada e medida por mês.....	28
Figura 10 - Gráfico do intervalo de confiança bootstrap para as médias dos valores de K anual	31
Figura 11 - Gráfico da serrapilheira acumulada simulada e medida por mês. ...	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores do K mensal para cada caixa.....	27
Tabela 2 - Valores de K da literatura e valores de K' correspondentes.....	29

RESUMO

ZANETTI, V. B. **Modelagem por sistemas dinâmicos da decomposição de serrapilheira na floresta de transição em Sinop, MT.** Cuiabá-MT, 2009. 45p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso.

A estimativa do coeficiente de decomposição tradicionalmente é feita usando-se modelos empíricos que nem sempre reproduzem o que acontece no solo da floresta completamente. Nesse sentido este trabalho propõe um modelo que tenta reproduzir tão fielmente quanto possível o processo natural da decomposição de serrapilheira. Os dados usados nesse trabalho foram coletados no período entre Maio de 2004 e Janeiro de 2007, numa área de floresta de transição Amazonia-Cerrado localizada a 60 km do município de Sinop, Mato Grosso, Brasil ($11^{\circ}24,75'$ S; $55^{\circ}19,50'$ W, 423 msnm). O modelo de simulação calculou um valor de K de $0,75 \text{ ano}^{-1}$, o que comparado aos valores encontrados na literatura é um valor condizente. Com o intuito de validar o modelo foi utilizado o teste não paramétrico de Scherer-Ray-Hare (Sokal & Rolf, 1997, pp. 446) que não detectou diferença significativa entre os valores simulados e medidos de serrapilheira acumulada ($\alpha = 45,7\%$). A partir dos valores de K simulados para cada ponto de amostragem foi possível calcular um intervalo de confiança do valor de K para aquela região que ficou entre 0,778 e 0,718, respectivamente limites inferior e superior do intervalo de confiança.

Palavras Chave: Sistemas dinâmicos, estatística não-paramétrica, Vensim.

ABSTRACT

ZANETTI, V. B. **Modeling by dynamic systems the litter decomposition in transition forest at Sinop, MT.** Cuiabá-MT, 2009. 45p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso.

The estimative of litter decomposition coefficient is traditionally calculated using empirical models, which usually don't reproduce completely what happens at forest soil, in this way, this work proposes a model that try to reproduces as completely as possivel the natural process of litter decomposition. The data used for modeling was acquired in the period between May of 2004 and January of 2007, in a transition Amazonia-Cerrado forest area, localized 60 km away of the city of Sinop, Mato Grosso, Brazil (11°24.75' S; 55°19.50' W, 423 asl). The simulation model, calculates the value of 0,75 to the litter decomposition coefficient, wich compared with the literature is near to what other authors have found. For validate the model it was used the Scherer-Ray-Hare test (Sokal & Rolf, 1997, pp. 446), which did not detected differences between the simulated values and the measured values for litter pool ($\alpha = 45.7\%$). From the simulated values for it measuring point, was able o calculate a confidence interval to the decomposition coefficient for the region which was between 0.778 and 0.718 respectively upper bounds and lower bounds of the confidence interval.

Keywords: Dynamic systems, non-parametrical statistes , Vensim.

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA

O homem é imanente à natureza, ou seja, está inseparavelmente contido ou entrelaçado. Na natureza, contudo, conforme ensina Darwin, muitas vezes os seres vivos assumem estratégias que não são necessariamente favoráveis a sua subsistência. Ações antrópicas promovem desdobramentos complexos que levam a dificuldades na definição dos horizontes para o ser humano. Um exemplo da complexidade das relações entre homem e natureza pode ser avaliada no amplo debate sobre a possibilidade de que, pela primeira vez, mudanças climáticas globais ocorram a curto prazo em função de ações de uma espécie.

O estudo da decomposição da serrapilheira fornece dados de como funciona a ciclagem de nutrientes e a reciclagem de recursos na natureza. Por isso, estudos nesse sentido vêm sendo feitos no mundo todo, nos mais variados ecossistemas. Na América do Sul estudos dessa natureza foram feitos nos diversos ecossistemas presentes na região, mas principalmente na floresta amazônica, pelo fato dessa ser a maior floresta tropical do mundo.

No caso do Brasil, país que contém a maior parte dessa floresta e apresenta grandes índices de crescimento demográfico, a compreensão deste ecossistema é um parâmetro para que as ações antrópicas junto ao meio ambiente ocorram de forma favorável à sustentabilidade mútua. Mato Grosso é um Estado brasileiro com grandes índices agropecuários. Essas atividades agrídem de forma direta o meio ambiente e ações como desmatamento e as queimadas, frequentes nesse Estado, estão entre as mais agressivas.

Assim sendo, a compreensão dos vários fatores que afetam o ambiente, por princípio, colabora para o equilíbrio ecológico do *locus* em questão, favorecendo assim a sustentabilidade dos ecossistemas presentes.

A floresta amazônica, possui aproximadamente 7 milhões de quilômetros quadrados e está localizada na região norte da América do Sul e seu território estende-se por 9 países da região, entre eles o Brasil, país no qual a floresta está

presente em 9 estados sendo um deles o Mato Grosso. A vegetação é composta principalmente por floresta equatorial, e apresenta grande diversidade de fauna e flora. O clima é equatorial, Af segundo a classificação de Köppen, e caracterizado principalmente por temperaturas altas e altos índices pluviométricos. O solo apresenta baixo teor de nutrientes sendo que a maior parte dos mesmos localiza-se numa estreita camada logo abaixo da superfície.

Neste contexto, baseando-se em coletas de dados feitas na região do município de Sinop no norte do Estado de Mato Grosso, este trabalho busca estabelecer um modelo para a decomposição da serrapilheira na região, para ajudar na melhor compreensão da ciclagem dos nutrientes na floresta.

1.2 JUSTIFICATIVA

Com o crescimento da ocupação urbana e a abertura de novas fronteiras agrícolas, as conseqüências dessas atividades no meio ambiente também crescem, e com o aumento dessas conseqüências faz-se necessário o entendimento de como o ambiente está reagindo a elas e assim encontrar maneiras de minimizar esses impactos. Nessa necessidade é que os estudos dos diversos fatores que interferem no desenvolvimento vegetal se justificam.

Buscar formas de melhorar a sustentabilidade do desenvolvimento é um dos objetivos do Grupo de Pesquisas em Física e Meio Ambiente, da Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT). Nesse sentido vários estudos têm sido feitos procurando formas de melhorar a compreensão do ambiente e encontrar alternativas viáveis de se manter o desenvolvimento e agredir menos o ambiente.

Uma das formas de melhorar essa compreensão é através de modelos matemáticos, que buscam explicar de forma empírica as interações existentes na natureza. Esses modelos são baseados no princípio da dinâmica de sistemas preconizado em 1961 por Jay W. Foster (*Dynamic Systems*, DS), que é usado para a modelagem de sistemas de qualquer natureza, através de representações gráficas associadas a um software de simulação computacional. Graças a esses recursos esses sistemas têm sido usados para facilitar o entendimento de diversos fenômenos naturais.

Um fenômeno bastante estudado, e que tem grande importância na ciclagem de nutrientes, é a decomposição da serrapilheira. Parte importante da ciclagem a decomposição da serrapilheira pode ser considerada um sistema dinâmico, com fluxos de entrada e saída bem determinados, podendo assim ser modelado com o uso da técnica de modelagem por sistemas dinâmicos, o que facilitaria a compreensão desse sistema e os impactos causados por sua eventual falha.

Enfim, o modelo desenvolvido neste trabalho deverá auxiliar na compreensão do processo de decomposição da serrapilheira e no seu ensino, ajudando dessa forma na melhora do relacionamento do homem com a natureza.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho teve por objetivo elaborar com sistemas dinâmicos um modelo para a decomposição da serrapilheira no solo da Floresta Amazônica no norte do Estado de Mato Grosso.

Para a realização deste trabalho, alguns objetivos específicos foram traçados, são eles:

- Estabelecer as equações diferenciais que relacionem as relações de causa e efeito associados à decomposição de serrapilheira;
- Estabelecer equações empíricas que se fizerem necessárias por modelagem estatística com base em séries históricas;
- Propor um modelo de simulação;
- Efetuar, com apoio de técnicas de *bootstrap*, a determinação de intervalos de confiança e análise da sensibilidade dos balanços implícitos no modelo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SERRAPILHEIRA

De acordo com Mason (1980) e Dias & Oliveira Filho (1997) serrapilheira é todo material da biota que se precipita à superfície do solo. São as folhas, os galhos, os frutos, as flores que senescem e caem da copa da plantas e também as raízes que morrem e entram em processo de decomposição no próprio solo, além de resíduos de origem animal. Nesse contexto a serrapilheira desponta como um fator importante por estar diretamente relacionada com a ciclagem dos nutrientes.

A serrapilheira é importante por atuar na superfície do solo como um sistema de entrada e saída, recebendo entradas via vegetação e, por sua vez, decomposta supre o solo e as raízes com nutrientes e matéria orgânica, sendo essencial na restauração da fertilidade do solo. Conforme Montagnini & Jordan (2002), as condições climáticas e a ação microbiana na decomposição da serrapilheira são os principais processos de ciclagem de nutrientes em um ecossistema florestal.

Os organismos mortos, que compõe a serrapilheira, são decompostos em partículas grandes, daí em partículas menores e, finalmente, em pequenas moléculas, como dióxido de carbono, água e componentes minerais. Essa decomposição representa um processo essencial na manutenção dos teores de nutrientes do solo e na reciclagem dos compostos da serrapilheira, sendo um fator que influencia a fertilidade de solos e o funcionamento de ecossistemas florestais, especialmente, em regiões de solos muito intemperizados como os tropicais (VALENTINI, 2004).

A serrapilheira é uma das principais fontes de matéria orgânica do solo. Uma vez formada no solo a decomposição desta matéria orgânica acontece mais lentamente; porém, é uma das maiores fontes de carbono no solo. O carbono que não é liberado para a atmosfera é incorporado no húmus do solo, ou solubilizado na água de percolação.

Os principais fatores que influenciam na decomposição da serrapilheira são: as condições climáticas, o tipo da serrapilheira, a natureza e a abundância de organismos decompositores (COÛTEAUX et al., 1995). Mason (1980) afirma que

entre processos de decomposição estão: a ação biológica, ação por erosão e lixiviação. Estudos indicam ainda que a decomposição é influenciada pela fauna do solo de cada região e pelas espécies formadoras da serrapilheira (HENEGHAN *et al.*, 1998), além das características físicas e químicas do ambiente (KING *et al.*, 2002; KOUKOURA *et al.*, 2003).

Os ecossistemas de florestas tropicais, em geral, apresentam produção contínua de serrapilheira, sendo que a quantidade produzida nas diferentes épocas do ano é determinada pelo tipo de vegetação (LEITÃO-FILHO *et al.*, 1993; RODRIGUES & LEITÃO FILHO, 2001). Assim sendo, a serrapilheira originada pelo material vegetal que se deposita continuamente sobre a superfície do solo é de grande importância para o ecossistema, uma vez que representa um estoque de nutrientes para a vegetação (LOUZADA *et al.*, 1995; RICHARDS, 1996).

Aduan (2003) afirma que a serrapilheira acumula uma quantidade de carbono duas a três vezes mais altas que a da atmosfera, além disso, a serrapilheira tem grande importância na regulação do fluxo de carbono e nutrientes entre a vegetação e o solo.

No mesmo contexto, Pringle (1997) diz que as condições climáticas dos trópicos, tipicamente quentes e úmidos, são ideais para os agentes de decomposição, fazendo com que as folhas que caem, apodreçam muito rapidamente, liberando assim os nutrientes nelas presentes para o solo, contribuindo com a manutenção do ciclo de nutrientes.

A serrapilheira constitui uma via importante do ciclo biogeoquímico (fluxo de nutrientes no sistema solo-planta-solo). Este ciclo, juntamente com o bioquímico (circulação de nutrientes no interior da planta), permite a sintetização da matéria orgânica através da fotossíntese pelas árvores nas florestas, reciclando os nutrientes principalmente em solos muito pobres, onde a biomassa vegetal é o seu principal reservatório (MELO & RESCK, 2003).

Ewel (1976) diz que a serrapilheira na superfície do solo é um sistema de entrada e saída, aonde a entrada vem da vegetação pela queda da serrapilheira e a saída acontece pela decomposição do material no solo. Neste contexto Ewel diz

ainda que a serrapilheira se acumulará enquanto a taxa de decomposição for menor que a taxa de queda da serrapilheira, e quando por fim se igualarem o sistema atinge um estado estacionário onde a quantidade de serrapilheira no solo varia em torno de um valor médio.

Ao considerar o raciocínio de Ewel (1976), e tomar a serrapilheira como um sistema de entrada e saída, pode se assumir que a deposição de serrapilheira seja constante, considerando porém uma taxa variável de queda, mais próxima do que ocorre no ambiente da floresta.

A determinação do coeficiente de decomposição pode ser feita de varias formas. A forma mais tradicional é a técnica que usa sacos de nylon, ou de outro material sintético, contendo uma quantidade determinada de serrapilheira em ambiente natural, para estimar, através de pesagens mensais, o quanto se decompõe, estabelecendo assim a taxa de decomposição mensal da serrapilheira. Esse método apesar de trabalhoso é largamente usado, pois produz resultados confiáveis e seguros da taxa de decomposição. Esse método de determinação por pesagem também aparece na literatura sendo feito em laboratórios, de forma que o coeficiente é obtido em condições controladas, para melhor entender o processo de decomposição do material. Frequentemente esse método aparece, como no trabalho de Alhand et. al. (2004), em conjunto com o método de Olson (1963) descrito abaixo.

Uma outra forma de estimar o coeficiente de decomposição é o uso de modelos matemáticos como o modelo de Olson (1963). Nesses modelos usam-se dados de campo e técnicas matemáticas e estatísticas para a determinação do coeficiente de decomposição da serrapilheira.

Olson (1963) modelou o processo da decomposição de serrapilheira através de uma aproximação do modelo do decaimento radioativo. Ele propõe em seu modelo uma constante k chamada de taxa de perda instantânea. O modelo de Olson é descrito pela equação:

$$\frac{dX}{dt} = L - kX \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde $\frac{dX}{dt}$ é a variação da quantidade de serrapilheira acumulada, L é a produção da serrapilheira, X é a quantidade de serrapilheira acumulada e k é a taxa de decomposição instantânea da serrapilheira.

Considerando o intervalo de tempo pequeno o suficiente, Olson, considera que a variação da quantidade de serrapilheira acumulada seja igual a zero, ou seja que para aquele intervalo de tempo a floresta se encontra em estado estacionário, decompondo a serrapilheira na mesma velocidade em que é produzida e assim chega na seguinte equação:

$$0 = L - kX_{ss} \quad (\text{Equação 2.2})$$

Logo:

$$k = L/X_{ss} \quad (\text{Equação 2.3})$$

Onde X_{ss} é a quantidade de serrapilheira acumulada no estado estacionário. Essa equação dará o valor de k necessário para que a taxa de variação seja nula. Esse k é um coeficiente que devido a natureza do seu cálculo não leva em consideração o principio probabilístico, implícito ao modelo do decaimento radioativo, segundo o qual o valor de k deve variar num intervalo fechado entre 0 e 1.

Olson também propõe uma equação para quando não se considera a produção de serrapilheira, como no experimento com bolsas descrito anteriormente. Partindo da Equação 2.1, considerando L igual a 0, o autor reescreve a equação e obtém que:

$$\frac{dX}{X} = -kdt \quad (\text{Equação 2.4})$$

Integrando a Equação 2.4 o autor chega a Equação 2.5.

$$\ln \left(\frac{X}{X_0} \right) = -kt \quad (\text{Equação 2.5})$$

Resolvendo chega-se à:

$$\frac{X}{X_0} = e^{-kt} \quad (\text{Equação 2.6})$$

Onde X é a quantidade atual de serrapilheira, X_0 é a quantidade de serrapilheira no momento inicial ($t = 0$), t é o intervalo de tempo de decomposição decorrido.

Para transformar o valor de k obtido pelas Equações 2.3 e 2.6 em um valor relativizado para uma unidade de tempo unitária, ele usa um modelo proposto por Jenny *et al* (OLSON *apud* JENNY *et al* 1950), que leva em consideração que o total decomposto tende a ser menor conforme a matéria se decompõe, pois se k for uma constante, levando em consideração a Equação 2.1, quanto menor o X menor o total de serrapilheira decomposto. Assim fazendo algumas simplificações matemáticas, ele chega a uma relação exponencial entre o k' proposto por Jenny e a taxa de decomposição instantânea (k), proposta por ele.

$$k' = 1 - e^{-k} \quad (\text{Equação 2.7})$$

Onde k' é o coeficiente de decomposição da serrapilheira e k é a taxa de decomposição de serrapilheira instantânea.

O modelo de Olson é o modelo mais comumente usado, porém freqüentemente os autores não fazem a transformação da taxa de decomposição instantânea para o coeficiente de decomposição. Esse problema pode ser observado, por exemplo, nos trabalhos de Vital *et al* (2004), Arato *et al* (2003) e Bambi (2007) nesses trabalhos os autores calculam apenas a taxa de decomposição instantânea e não o coeficiente de decomposição da serrapilheira, apesar de afirmarem o contrário.

Outros autores como Wang *et al* (2008) e Li *et al* (2009), calculam apenas o coeficiente de decomposição, tomando por base apenas a serrapilheira acumulada.

As duas formas de determinação do coeficiente de decomposição descritas acima são as mais usadas mundialmente sendo, portanto, as mais aceitas na comunidade científica. Porém novos modelos, como o de Kumada *et al* (2008), vem sendo propostos. O modelo de Kumada, tem por objetivo principal estimar a dinâmica do carbono na serrapilheira, porém, para atingir tal objetivo, ele calcula de forma bastante completa e complexa a decomposição da serrapilheira. A complexidade maior do método de Kumada está no fato de ele levar em consideração

a remoção da serrapilheira do local estudado, aumentando assim o número de variáveis do sistema.

2.2 MODELAGEM DE SISTEMAS DINÂMICOS

Existem várias formulações matemáticas para modelar fenômenos da natureza, processos biológicos e químicos. Como exemplos citam-se as Leis Gravitacionais de Newton, os modelos populacionais, as equações de reação e difusão, as equações de Einstein, etc.

A teoria dos sistemas dinâmicos aborda processos que evoluem e mudam de forma no tempo e visa estabelecer uma compreensão qualitativa de uma classe ampla de sistemas (contínuos, diferenciáveis, analíticos, algébricos, descontínuos).

Um exemplo usado no manual do programa computacional Vensim em sua versão 5.7a DSS, desenvolvido pela empresa Ventana Systems, Inc., para exemplificar os sistemas dinâmicos, é o de um termostato que, desenhado para manter um ambiente a uma faixa de temperaturas específicas, quando a temperatura está abaixo do limite inferior liga o aquecedor até a temperatura ambiente atingir o limite superior, quando ele desliga o aquecedor e só voltará a ligá-lo quando a temperatura ultrapassar o limite inferior.

Os modelos matemáticos correspondentes aos processos abordados pela teoria de sistemas dinâmicos são usualmente construídos via equações diferenciais. Em modelos simplificados, são usadas equações diferenciais ordinárias, estas podem ser resolvidas utilizando-se métodos numéricos para solução de equações diferenciais ordinárias. Como por exemplo, os métodos de Runge Kutta entre outros.

A construção de modelos por sistemas dinâmicos, conforme Shiflet & Shiflet (2007) segue um processo cíclico, pois a cada nova etapa a etapa anterior deve ser revista, e só então o processo continua. Dentro deste ciclo, conforme o autor, os passos podem ser observados na Figura 3. Esses passos serão descritos a seguir ainda baseando-se nas descrições do autor.

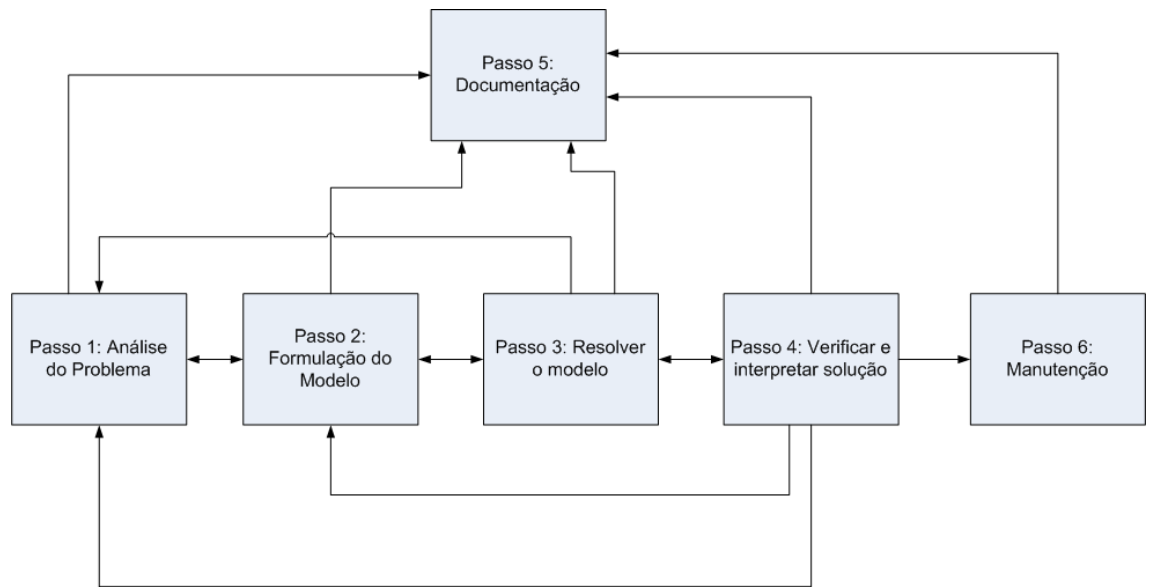


Figura 1 - Fluxograma do processo de modelagem por sistemas dinâmicos

Análise do problema: antes da modelagem é necessário um estudo minucioso do problema para determiná-lo e para entender as questões fundamentais que o envolvem. Nesse estágio é decidido o escopo do modelo e os objetivos deste modelo.

Formulação do modelo: Nesse estágio é feito o desenho do modelo que será estudado. O desenho dos modelos por sistemas dinâmicos é baseado em dois pares de constructos: recursos e informações, níveis e razões de fluxo.

- **Recursos e Informações:** recursos correspondem aos materiais ou partes físicas do sistema. Podem ser consumíveis (à medida que a atividade dentro do sistema se realiza) ou catalíticos (recursos que permitem a transformação de recursos consumíveis). Já, as informações são os meios não físicos pelos quais o controle é exercido.

- **Níveis e Razões de Fluxo:** Níveis ou estoques são acumulações de recursos dentro do sistema. Razões de fluxo são os movimentos de recursos que levam os níveis a elevar-se, cair, ou permanecer constantes. Podemos interpretar de uma forma simples como opera um sistema com níveis e razões de fluxo, fazendo uma analogia com uma simples caixa

d'água. Se o volume de água que entra for maior do que o volume que sai, a caixa d'água encherá. Caso contrário, ela esvaziará.

A representação de fluxos e estoques presente na Figura 4 explicita a simbologia utilizada em modelagem por sistemas dinâmicos conforme utilizada pelo programa computacional Vensim. Nesta figura o retângulo representa o estoque; as flechas com duas linhas sólidas representam os fluxos físicos com sua variável de fluxo; as demais são variáveis auxiliares ou constantes; as nuvens representam a fonte e o destino; e, as setas representam os sentidos dos fluxos de informação.

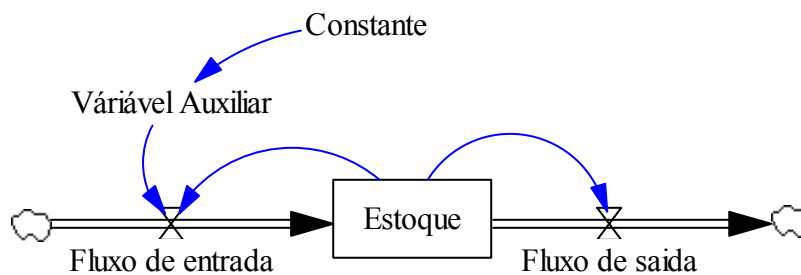


Figura 2 - Diagrama de Fluxos

Segundo Shiflet & Shiflet (2007) a formulação do modelo segue alguns passos:

- Coleta de dados: coletam-se os dados relevantes para obterem-se informações sobre o problema e seu comportamento.
- Fazer simplificações e documentá-las: ao formular um modelo deve-se atentar ao fato de que muitas vezes o problema é simplesmente complexo demais para ser considerado por inteiro, então será necessário fazer simplificações e, algumas vezes, ignorar partes do problema para que o modelo não se torne impossível do ponto de vista pragmático. Em alguns casos, devido à necessidade de

simplificação do modelo será necessário voltar a análise do problema e redefinir o escopo do modelo.

- Determinar variáveis e suas unidades: nesse ponto devem-se especificar as variáveis e suas unidades. As variáveis podem ser independentes ou dependentes. Uma variável independente é uma variável que não depende de outras, mas outras dependem dela. Um bom exemplo é o tempo na maioria dos modelos. As variáveis dependentes normalmente serão explicadas pelo modelo, pois é nelas que está o problema a ser estudado. Por exemplo, ao estudar o decaimento radioativo a massa do átomo diminui no tempo, então nesse modelo a massa do átomo é uma variável dependente, enquanto o tempo é independente. Ao estabelecer uma variável deve-se indicar a unidade da mesma.

- Estabelecer relações entre variáveis e sub-modelos: Ao desenhar os modelos deve-se indicar cada relação entre variáveis e, se existirem, os sub-modelos que compõe o sistema. Muitas vezes para simplificar o modelo é preciso assumir simplificações das relações entre as variáveis, e muitas vezes também não considerar alguns sub-modelos.

- Determinar as equações e funções: Ao estabelecer as relações entre as variáveis, é necessário determinar também as equações e funções que as regem. Por exemplo, no modelo do decaimento radioativo, a variação da massa no tempo segue uma função exponencial.

Resolver o modelo: Esse é o estágio da implementação. A solução do modelo deve ser tão precisa quanto possível, dando origem a uma solução que aproxima-se ao máximo o modelo da realidade. Para a solução dos modelos será necessário o uso de várias técnicas e ferramentas distintas como a álgebra, o cálculo numérico e programas de computadores. Caso o modelo seja ainda muito complexo para ser resolvido, deve-se voltar ao estágio da formulação e fazer simplificações adicionais, ou ainda voltar a análise do problema e delimitar melhor o escopo.

Verificar, validar e interpretar a solução do modelo: Uma vez que o modelo esteja resolvido, os resultados devem ser avaliados cuidadosamente de forma a determinar se os resultados têm sentido (verificação), se resolvem o problema proposto (validação) e se o modelo é viável de se utilizado. O processo de verificação determina se a solução funciona corretamente, enquanto o processo de validação estabelece se o sistema satisfaz os requerimentos do sistema. Parte da verificação consiste em confrontar os dados com dados reais, para determinar sua verossimilhança, além disso, deve-se cuidar para que todos os dados das variáveis independentes correspondam às mesmas faixas. Se a solução do modelo não puder ser considerada adequada face aos referentes adotados, novamente, deve-se voltar aos primeiros passos e determinar se é necessária uma simplificação ou um refinamento. Apesar de serem diferentes, devido ao sistema cíclico, refinamento e simplificação podem coexistir. Por exemplo, refinando o modelo provavelmente deve-se aumentar o escopo do problema e ao fazer isso pode ser necessário simplificar mais variáveis. Por fim, o modelo deve ser usável, ou seja, ele deve ser pragmático, para isso o modelo não pode ser pesado demais, a ponto de um computador não conseguir executá-lo em um tempo razoável, e também não pode ser sintético demais ao ponto de não resolver o problema completamente.

Documentar o modelo: Essa fase é importante para que o modelo seja documentado a ponto de facilitar utilização e reprodução do mesmo. O material produzido deve dispor sobre os seguintes itens:

- Análise do problema: apresentação detalhada de como foi feita a análise do problema.
- Desenho do modelo: descrição com textos, grafos e figuras de como as variáveis se relacionam entre si e foram tratadas.
- Solução do modelo: exposição das técnicas aplicadas para a solução dos modelos, o que inclui descrições básicas das mesmas e também os resultados gerados pelas mesmas.

- Resultados e conclusões: discussão dos resultados gerados pelo mesmo, suas implicações e possíveis interpretações, além das conclusões retiradas dessa interpretação.

Manutenção do modelo: Depois da conclusão da modelagem e da documentação é imprescindível a manutenção do modelo, de forma a mantê-lo funcional e atualizado. Tratando a modelagem como um ciclo, é normal que nessa fase façam-se novas leituras do modelo e em alguns casos pode se percorrer todo o ciclo novamente visando melhorar a qualidade do mesmo.

O processo de construção do modelo é flexível e iterativo, de forma que quanto mais se trabalhe um modelo, mais relações serão explicitadas, novas hipóteses serão formadas e o modelo terá de ser mudado para descrever também essas relações. Esses passos também não são necessariamente uma seqüência, já que podem-se executar mais de um deles simultaneamente, assim como voltar a passos anteriores e rever as soluções adotadas para os problemas de forma a garantir a confiabilidade do modelo.

O conceito central para a construção de modelos de sistemas dinâmicos está em entender como os objetos de um sistema interagem entre si, onde uma mudança em uma variável afeta outras variáveis com o passar do tempo. Essas modificações por sua vez alteram a variável original, e assim consecutivamente. Dessa forma, o que a técnica faz é explicitar a estrutura básica de um sistema e facilitar o entendimento do comportamento que ele pode produzir, utilizando-se de recursos gráficos e desenhos dos modelos que descrevem o sistema ou problema.

Shiflet & Shiflet (2007, pp. 10) descreve por fim o processo de modelagem como:

[...] uma criativa jornada científica. Onde os problemas que modelamos usualmente não têm uma resposta correta. Os problemas são complexos e muitos modelos

provêm boas, embora diferentes, soluções. Dessa forma modelar é uma aventura desafiadora, infundável e excitante.¹

A modelagem de sistemas dinâmicos conforme apresentada, é um processo trabalhoso e por vezes longo, mas que, caso bem feito, leva a resultados seguros e confiáveis e por isso seu uso e suas aplicações vêm crescendo e se diversificando a cada dia, fazendo com que novas descobertas sejam feitas sobre os processos que regem o planeta e a vida, e também sobre o quanto cada ação antrópica afeta o bom funcionamento desses processos.

2.3 BOOTSTRAP

O método de *bootstrap* foi sistematizado pela primeira vez por Bradley Efron (1979), mas seus conceitos já eram conhecidos e inclusive usados antes dessa data. Em termos gerais trata-se de um método de estimativa e avaliação da variabilidade em estatística e seu principal trunfo está em poder-se trabalhar com amostras pequenas, já que o método usa técnicas de reamostragem com reposição.

Bootstrap é o nome que se dava ao cordão usado para amarrar as botas, o termo ficou famoso através de uma estória do personagem Barão de Münchhausen, tido como o campeão dos mentirosos. Nessa estória o Barão saía da areia movediça puxando-se para cima pelos seus bootstraps, algo conhecidamente impossível de ser feito. Assim surgiu o ditado inglês *pull yourself up by your bootstraps*, ditado esse que foi a inspiração de Efron para o nome de seu método, já que o mesmo é capaz de "repetir" um experimento sem ter que ir a campo novamente.

Segundo Manly (2007) a essência do bootstrap consiste na idéia que na falta de qualquer outro conhecimento a respeito da população, a distribuição dos valores obtidos através de uma amostra de tamanho n desta população é o melhor guia para inferir-se acerca da distribuição da população. Em outras palavras, a população formada pelos n valores amostrados, cada qual com uma probabilidade de $1/n$, é usada para modelar a população real que é desconhecida.

¹ Tradução própria. "The modeling process is a creative, scientific endeavor. As such, a problem we are modeling usually does not have one correct answer. The problems are complex, and many models provide good, although different solutions. Thus Modeling is a challenging, open-ended, and exciting venture. (Shiflet & Shiflet (2007) and Shiflet, 2007, pp. 10)"

O bootstrap é definido ainda por Zoubir & Boashash (1998) como: “[...] uma poderosa técnica para se obter a acurácia de um estimador de parâmetro, em situações nas quais as técnicas convencionais não são válidas.²”

As pesquisas sobre bootstrap tiveram um foco inicial no cálculo de intervalos de confiança para parâmetros populacionais, mas também houve o interesse por testes de significância bootstrap. Para esse trabalho trata-se apenas dos intervalos de confiança bootstrap, pois eles serão usados na solução do modelo.

Efron (1979) descreve o que é comumente chamado de método de percentiis. Neste método os limites $100(1 - \alpha)\%$ de um parâmetro, são simplesmente os dois valores que contenham o centro para esse intervalo das estimativas obtidas pelo bootstrap.

Assim sendo, suponha que se está tentando encontrar um intervalo de confiança $100(1 - \alpha)\%$, para o parâmetro θ , para o qual exista um estimador $\hat{\theta}$ baseado numa amostra aleatória de uma população de interesse. Suponha também que exista uma função monotônica crescente, e dessa forma os valores transformados $f(\hat{\theta})$ seguem a distribuição normal tendo média $f(\theta)$ e desvio padrão de 1.

Nessa situação existe uma probabilidade de $1 - \alpha$ que a sentença abaixo contenha qualquer valor de $f(\theta)$, e onde $z(\alpha/2)$ é o valor excedente com probabilidade $\alpha/2$ para a distribuição normal (Figura 1).

$$f(\theta) - z_{\alpha/2} < f(\hat{\theta}) < f(\theta) + z_{\alpha/2} \quad (\text{Equação 2.8})$$

Dessa forma,

$$f(\hat{\theta}) - z_{\alpha/2} < f(\theta) < f(\hat{\theta}) + z_{\alpha/2} \quad (\text{Equação 2.9})$$

Caso a função de transformação seja conhecida, os valores do intervalo da equação 2.5, podem ser transformados de volta para gerar um intervalo para o estimador θ , com os mesmo níveis de confiança.

² Tradução própria. “[...] a powerful for assessing the accuracy of a parameter estimator in situations where conventional techniques are not valid.”

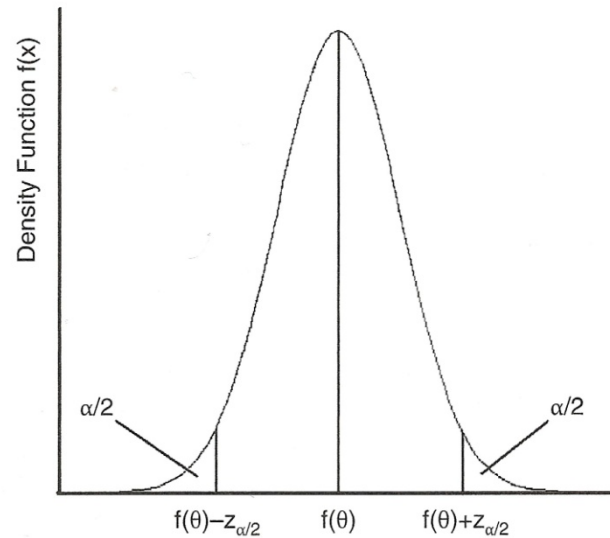


Figura 3 - Distribuição normal do estimador transformado, com seu intervalo de confiança (MANLY, 2007, pp.47).

Hall (MANLY *apud* HALL 1992) chamou de intervalo de confiança por percentiis o que é comumente chamado de "o outro modelo de percentiis". O conceito por traz deste método consiste em uma distribuição bootstrap imitar a distribuição na qual se está interessado. Levando-se em consideração isso pode-se afirmar que a distribuição do erro em $\hat{\theta}$, $\varepsilon = \hat{\theta} - \theta$, é aproximado pela distribuição do erro bootstrap que é $\varepsilon_B = \widehat{\theta}_B - \hat{\theta}$. Com base nisso é possível criar uma distribuição bootstrap de ε_B de modo a se encontrar dois erros ε_L e ε_H de forma que:

$$Prob(\varepsilon_L < \widehat{\theta}_B - \hat{\theta} < \varepsilon_H) = 1 - \alpha \quad (\text{Equação 2.10})$$

De tal forma que a probabilidade de um erro menor que ε_L é $\alpha/2$ e a probabilidade de um erro maior que ε_H é também $\alpha/2$. Assim assumindo que a distribuição bootstrap dos erros é uma boa aproximação da distribuição real dos erros, pode se assumir que:

$$Prob(\varepsilon_L < \hat{\theta} - \theta < \varepsilon_H) = 1 - \alpha \quad (\text{Equação 2.11})$$

de tal sorte que:

$$Prob(\hat{\theta} - \varepsilon_H < \theta < \hat{\theta} - \varepsilon_L) = 1 - \alpha \quad (\text{Equação 2.12})$$

Neste segundo método de percentiis, para se obter um intervalo de confiança de $100(1 - \alpha)\%$, ε_L e ε_H seriam os dois valores que definam os $100(1 - \alpha)\%$ centrais da distribuição bootstrap do erro ε_B , e dessa forma o intervalo de confiança para θ seria

$$\hat{\theta} - \varepsilon_H < \theta < \hat{\theta} - \varepsilon_L \quad (\text{Equação 2.13})$$

Os dois métodos de intervalos de confiança por percentiis vem sendo muito difundidos (Manly, 2007), porém um problema com relação a esses métodos é que sua acurácia depende de uma amostragem bootstrap muito grande para determinar com precisão os percentiis e garantir um intervalo de confiança mais exato.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área experimental se situa a aproximadamente 60 km da cidade de Sinop, Mato Grosso, Brasil, 11°24,75' s; 55°19,50' w, 320 m de altitude acima do nível do mar, em uma área de floresta de transição Amazônia-Cerrado onde se encontra instalada uma torre de observação micrometeorológica (Figura 2).

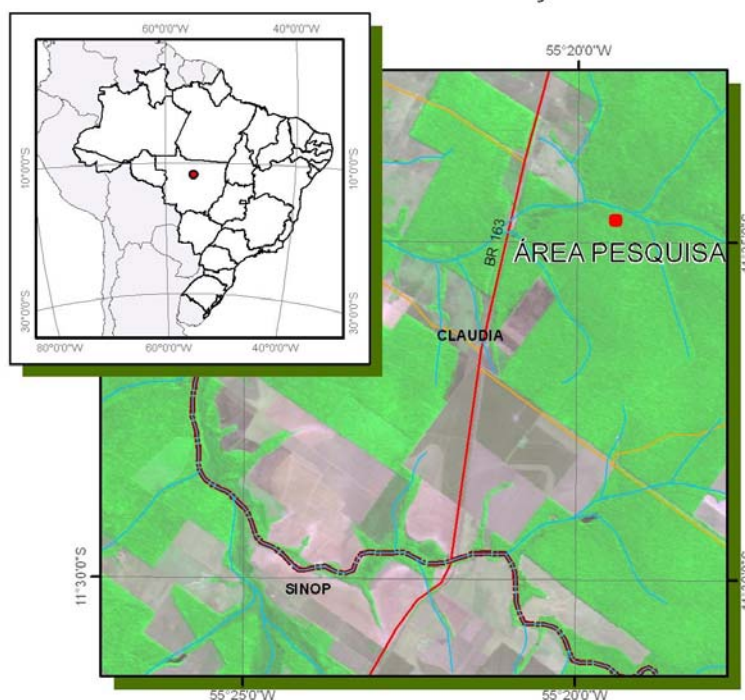


Figura 4 - Localização da área da área de pesquisa

A vegetação consiste em espécies arbóreas, semidecíduais, com espécies características da floresta de transição amazônica, como *Tovomita Schomburkii*, *Qualea Paraensis* e *Brosimum Lactescens* (MIRANDA *et al.*, 2005).

A região apresenta sazonalidade característica com um período seco de junho a agosto e um período úmido de dezembro a fevereiro, sendo o período de março a maio compreendido como de transição úmido seco, e o período de setembro a novembro de seco úmido. A temperatura média anual na região é aproximadamente 24,8°C e a precipitação de 2200 mm ano⁻¹ (PRIANTE *et al.*, 2004).

O solo é um neossolo quartzarênico órtico típico a moderado álico, com profundidade de 0,50 cm e textura arenosa com 83,6% de areia, 4,4% de silte e 2,2% de argila (PRIANTE et al., 2004). Estes solos, além de bastante arenosos, são pobres em nutrientes, têm alta porosidade e drenam rapidamente a saturação provocada por fortes chuvas (SPOLADOR et al., 2005).

3.2 MODELAGEM

Para a construção do modelo deste trabalho foram adaptados os passos propostos por Shiflet & Shiflet (2007). Essa adaptação resultou no fluxo de trabalho apresentado na Figura 5.

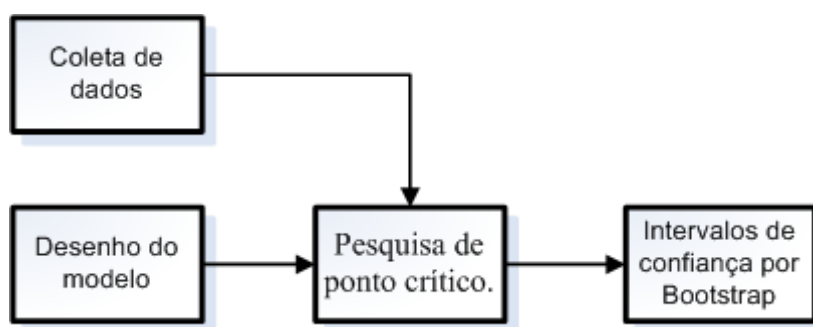


Figura 5 - Fluxograma de trabalho da modelagem

3.2.1 Desenho do Modelo

Para o desenho do modelo foi utilizado o software Vensim, em sua versão 5.7a DSS. O modelo desenvolvido para a decomposição da serrapilheira baseia-se na probabilidade de que uma dada quantidade de massa tem em uma unidade de tempo em se decompor. Se k representa essa probabilidade, designada de coeficiente de decomposição, $N(t)$ é a quantidade de serrapilheira existente, $P(t)$ a serrapilheira produzida e $[-k \cdot N(t)]$ a quantidade de serrapilheira decomposta e $N(0)$ a quantidade de serrapilheira pré-existente. A quantidade de serrapilheira decomposta por unidade de tempo é igual a menos a derivada temporal da função $N(t)$.

$$\frac{dN(t)}{dt} = -k \cdot N(t) + P(t) \quad (\text{Equação 3.1})$$

Esse modelo segue a proposta de Olson (1963), mas não estabelece nenhum pressuposto. Uma representação gráfica do modelo pode ser observada na Figura 6.

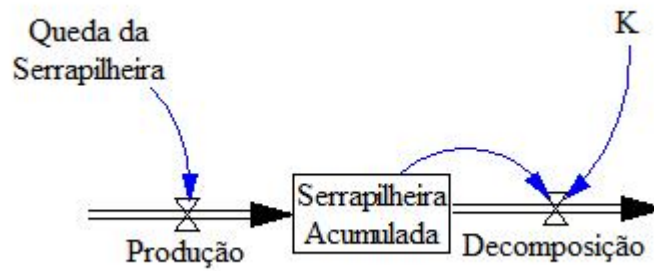


Figura 6 - Modelo matemático de simulação da serrapilheira

Neste modelo *Queda da Serrapilheira* é a variável que representa a serrapilheira produzida coletada em campo, conforme experimento descrito no tópico coleta de dados, em um mês é expressa em gramas por metro quadrado por mês ($\text{gm}^{-2}\text{mês}^{-1}$)

Produção é a variável de fluxo que faz a entrada dos dados de produção de serrapilheira, tem valor igual *Queda da Serrapilheira* ($\text{gm}^{-2}\text{mês}^{-1}$).

A variável de fluxo *Decomposição* representa o fluxo de saída por decomposição da serrapilheira no solo da floresta. É dada pelo produto entre a *Serrapilheira Acumulada* (gm^{-2}) e a taxa de decomposição K (mês^{-1}). Dessa forma o fluxo representa quanto material por mês desaparece, ou seja, termina de se decompor. Sua unidade é a mesma do fluxo *Produção*, gramas por metro quadrado por mês ($\text{gm}^{-2}\text{mês}^{-1}$)

O estoque *Serrapilheira Acumulada* representa quanta serrapilheira fica acumulada no solo da floresta, formando a camada de material em decomposição que cobre o mesmo.

3.2.2 Coleta de Dados

As coletas de serrapilheira foram realizadas mensalmente, no período de maio de 2004 a janeiro de 2008.

Para a quantificação da serrapilheira produzida, foram instalados de forma aleatória em 1 hectare na área experimental 20 coletores de madeira de 1 m^2 com uma altura de borda de 0,20 m e fundo em tela de nylon de malha de 2,5 mm. Estes coletores foram instalados a 0,20 m do solo (Figura 7) de forma que não houvesse

contato entre o material depositado em seu interior e o solo, evitando-se desta forma o processo de decomposição. A opção pelo fundo em tela de nylon é uma alternativa para evitar o acúmulo de água dentro dos coletores no período chuvoso.



Figura 7 - Caixa coletora de serrapilheira de 1m² utilizada para coleta de serrapilheira produzida.

Para estimar a serrapilheira acumulada sobre o solo foi utilizado um coletor de metal em molde vazado de dimensões 0,25 m x 0,25 m (0,0625 m², Figura 8) sendo coletado o material depositado próximo aos coletores de serrapilheira produzida.

Após coletadas as amostras, tanto do material produzido quanto do acumulado sobre o solo, estas foram armazenadas em sacolas plásticas devidamente identificadas e levadas até o laboratório do Núcleo de Tecnologia de Armazenagem (NTA) da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, da Universidade Federal de Mato Grosso, onde foram segregadas as frações formadoras da serrapilheira (folhas, galhos, frutos e flores), acondicionadas em sacos de papel kraft e levadas para secagem em estufa de ventilação forçada a 70°C durante 72h e posteriormente pesadas em balança analítica.



Figura 8 - Coletor em molde vazado de 0,25 m x 0,25 m utilizado para coleta de serrapilheira acumulada.

3.2.3 Pesquisa do Ponto Crítico

Para a pesquisa do coeficiente de decomposição, K , foi usada a ferramenta de análise de sensibilidade do software Vensim. Essa ferramenta varia, utilizando o método de Monte Carlo e uma distribuição escolhida, os valores iniciais de qualquer parâmetro do modelo. Para a pesquisa adotou-se para K a distribuição uniforme com o intervalo fechado entre 0,01 e 0,99 e 20000 simulações.

Com os dados simulados para o estoque *Serrapilheira Acumulada*, foi possível pesquisar o valor de K para cada caixa que levava a menor média dos quadrados dos desvios entre o estoque de serrapilheira observado e simulado. Para tanto usando a Equação 3.2 e retirando do banco de dados os dados de serrapilheira acumulada coletados, calculou-se a média dos quadrados dos desvios, e com essas médias gerou-se um banco de dados em formato de planilha eletrônica para posterior análise.

A média dos quadrados dos desvios é dada pela equação:

$$\epsilon_i = \frac{\sum_j (s_{ij} - S_{ij})^2}{n} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde: ϵ_i é a média do quadrado do desvio da i ésima caixa, S é o valor simulado para a mesma, S_o é o valor observado em campo e n é o número de observações.

Com os dados gerados pelo modelo foi possível, fazer uma ordenação dos dados levando em conta a média dos quadrados dos desvios e assim determinar qual o valor de K que resultava no menor valor para essa média. Posteriormente foram gerados gráficos usando-se os dados dessa planilha, que permitiram visualizar o ponto de ϵ_i mínimo.

Para facilitar a comparação dos resultados obtidos com os resultados encontrados na literatura, transformou-se essa média mensal em média anual utilizando a seguinte expressão:

$$K_q = 1 - (1 - K_t)^{\frac{q}{t}} \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde: “ K_q ” é o valor de K para o intervalo de tempo desejado, “ K_t ” é o valor de K para o intervalo de tempo que possui, “ q ” é o intervalo de tempo que desejo e “ t ” é o intervalo de tempo que tenho.

3.2.4 Intervalos de Confiança *Bootstrap*

A partir dos valores de K , determinados por caixa conforme descrito anteriormente, foi calculado um intervalo de confiança do K para a área. Foram usados para esse intervalo de confiança o valor ótimo do K para cada caixa, de forma que esse intervalo representasse o valor de K ótimo para aquela área de estudos.

Para o cálculo do intervalo de confiança usou-se o software *Crystal Ball* (Modelo 6.0, Decisioneering Inc., Denver, Colorado, U.S.A) que aplicando o modelo de *bootstrap* por percentis determinou o intervalo de confiança para um α de 5%. O uso deste programa exigiu a criação de uma nova planilha eletrônica contendo desta vez apenas os valores de K ideais para cada caixa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado principal desse trabalho é o modelo unidimensional de decomposição da serrapilheira que foi desenvolvido com a metodologia de sistemas dinâmicos.

A metodologia de modelagem por sistemas dinâmicos tem a vantagem de ser mais compreensível para leitores menos instruídos, pois usa um sistema de grafos que torna a interface com o usuário mais amigável sem perder o rigor matemático do modelo. Esse rigor matemático também pode ser observado na forma de aleatorização utilizada pelo programa Vensim, para gerar os valores de K que serão testados, pois ao utilizar um algoritmo de geração de números aleatórios por Monte Carlo, o programa assegura que os valores de K testados no modelo seguirão fielmente a distribuição indicada pelo usuário e serão aleatoriamente gerados, retirando-se assim uma possível tendência na escolha dos valores testados no modelo.

Por ser mais amigável aos leitores menos instruídos o modelo desse trabalho poderia ser utilizado para o ensino do processo de decomposição de serrapilheira, pois por ser mais visual facilitaria a compreensão do processo pelos alunos cumprindo dessa forma o propósito inicial da metodologia de modelagem por sistemas dinâmicos que é o educacional.

O uso de dados de queda de serrapilheira coletados na floresta faz com que o modelo simule a decomposição levando em conta os dados de queda, e assim represente como o processo realmente ocorre na natureza, sem intervenção humana. Os modelos de serrapilheira mais tradicionais abordados anteriormente usam médias para a queda de serrapilheira ou abordam simplesmente a decomposição sem se preocupar com a queda. Nesses modelos a fidelidade em representar o que acontece na floresta acaba sendo afetado por aproximações nessas taxas de queda, ou quando não abordam a queda da serrapilheira representam apenas parcialmente a realidade. Nesse sentido o modelo por sistemas dinâmicos traz um avanço por representar o mais realisticamente possível o que acontece em campo.

Já modelos como o de Kumada et al (2008) vão ainda além e levam também em consideração a interferência humana. Este trabalho, no entanto, o autor discute o que acontece sem a interferência humana e assim sendo o principal parâmetro de comparação serão os modelos clássicos.

O modelo por sistemas dinâmicos do presente trabalho pode ser facilmente aplicado em dados de serrapilheira em diversos locais e em diversos tipos de florestas ou vegetações, já que o modelo não considera nenhuma particularidade das espécies que compõe a área de estudo, e assim sendo a validação do modelo para outras áreas é relativamente fácil já que não são necessários grandes ajustes para que o modelo passe a representar a realidade de uma nova área de estudos.

Pode-se ainda considerar a escalonabilidade do modelo proposto neste trabalho, pois é possível fazer com que o modelo leve em consideração outros fatores da decomposição de serrapilheira acrescentando-se as variáveis que se acredita afetar essa decomposição e determinando seu impacto sobre o modelo. Esse impacto pode ser avaliado usando a média dos quadrados dos desvios, assim como foi feito nesse trabalho, pois com uma comparação dos valores dessa média alcançados com e sem a nova variável a ser acrescentada, é possível observar uma melhora ou piora na eficácia do modelo em simular a decomposição da serrapilheira.

Um resultado do modelo é o valor de K , calculado. Foi possível observar que o valor do erro cresce rapidamente quando o valor de K é menor do que o ideal, ou seja, os maiores erros acontecem quando o valor de K tende à 0. Isso se deve à natureza do valor do K , pois um menor valor de K indica um maior acúmulo de serrapilheira, e para valores muito baixos esse acúmulo será tão grande que gerará uma média dos quadrados dos desvios muito alta.

Os valores de K considerados ideais são aqueles que produzem a menor média dos quadrados dos desvios, ou seja, os valores do coeficiente de decomposição foram pesquisados de forma a aproximar ao máximo a simulação da realidade, de forma que o modelo então representasse tão fielmente quanto possível o que acontece em campo. Os valores de K ideais para cada caixa estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores do K mensal para cada caixa.

Caixa	K (coeficiente de decomposição)(mês ⁻¹)
1	0,11585
2	0,06761
3	0,10573
4	0,10277
5	0,12083
6	0,12521
7	0,13156
8	0,12935
9	0,12152
10	0,12128
11	0,13368
12	0,11008
13	0,09125
14	0,12451
15	0,10626
16	0,11268
17	0,08104
18	0,07884
19	0,13745
20	0,11350

Os valores do coeficiente de decomposição observados na Tabela 1 são valores de K mensais, e representam quanto de serrapilheira se decompõe mensalmente, a média dos valores de K encontrados foi de 0,111555 mês⁻¹.

Com o intuito de validar os dados obtidos pela simulação, e garantir a representatividade dos valores de K estimados pelo modelo, pretendeu-se utilizar um procedimento de análise de variância convencional. Os dados, contudo, conforme os testes de Levene e de Kolmogorov-Smirnov, apresentaram forte heterocedasticidade e desvios da normalidade que inviabilizaram o uso do procedimento convencional. Dessa forma optou-se pelo teste não paramétrico de Scheirer-Ray-Hare (Sokal &

Rolf, 1997), neste observou-se que para um $\alpha = 45,7\%$, não se detectou diferenças entre valores observados e simulados. Porém a iteração entre o modelo e os meses é significativa ($\alpha = 0,00\%$), o que pode ser explicado pelo fato de o modelo suavizar as variações da serrapilheira acumulada no tempo o que leva a diversas intersecções entre as curvas de dados simulados e medidos, e torna a iteração significativa. A Figura 9 mostra um gráfico dos escores calculados pelo teste de Scherer-Ray-Hare, pelos meses, nesse gráfico é possível notar essa iteração entre as curvas.

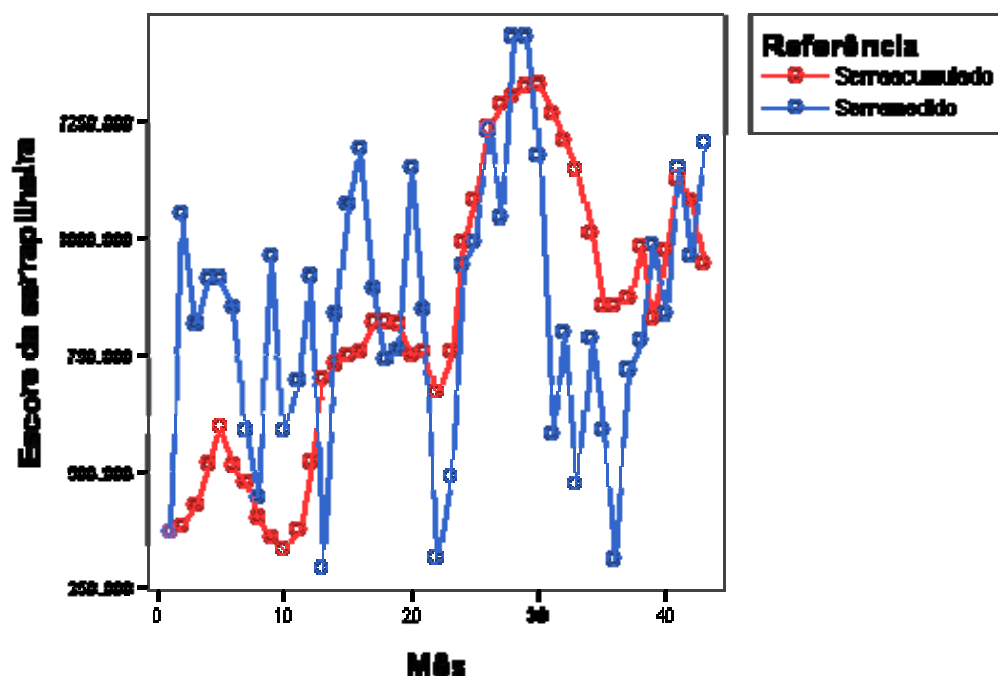


Figura 9 - Gráfico dos escores de serrapilheira acumulada simulada e medida por mês.

Com o intuito de certificar que o modelo não é tendencioso, realizou-se o teste de randomicidade de Wald-Wolfowitz (Siegel & Castellan Junior, 2006) para todas as caixas, o que resultou num α médio de 0,29, e a partir deste valor podemos afirmar que o modelo não possui tendências, o que reforça o teste de Scherer-Ray-Hare, no sentido de afirmar que não puderam ser detectadas diferenças significativas entre os valores medidos e simulados.

Transformando-se o K mensal obtido em um K anual através da Equação 3.2 e considerando todas as caixas obteve-se um K médio anual de 0,758137, ou seja anualmente cerca de 75% do estoque de serrapilheira é decomposto.

Esse valor de K, também indica que anualmente cerca de 25% da serrapilheira no solo da floresta não é decomposta, gerando assim um acúmulo de serrapilheira, indicando com isso a existência de um estoque de nutrientes no solo da floresta. Esse acúmulo pode significar que, considerando-se que a floresta encontra-se em equilíbrio, ela precisa de um excedente de serrapilheira acumulada para manter o equilíbrio. Isso também pode ser um indicador de que a absorção desses nutrientes pelo solo da floresta, caracterizada pela decomposição da serrapilheira, é lento frente ao seu acúmulo.

A fim de comparar os resultados obtidos com os resultados de K obtidos pela literatura foi necessário transformar esses valores de K em valores de K', utilizando-se a Equação 2.7. Para explicitar os valores obtidos pela literatura e os valores transformados foi organizada a Tabela 3.

Tabela 2 - Valores de K da literatura e valores de K' correspondentes

Autor	K	K'
Vital <i>et al</i>	1,7	0,817
Wang <i>et al</i>	0,71	0,508
Wang <i>et al</i>	0,99	0,628
Palma <i>et al</i>	0,28	0,244
Palma <i>et al</i>	0,04	0,039
Li et al	0,39	0,323
Li et al	0,51	0,399

O valor de K médio anual encontrado por esse trabalho aproxima-se dos valores de K' correspondentes aos valores de K encontrados por Vital *et al.*(2004) e Wang *et al* (2008), que usando o método de Olson (1963), para floresta semi-decídua no Estado de São Paulo, Brasil, e uma monocultura de coníferas na China respectivamente, encontraram valores de K' de 0,817 para Vital e variando entre

0,508 e 0,628 para Wang. Palma *et al* (1998) e Li *et al* (2009) encontraram valores menores que os desse trabalho sendo que os valores encontrados por Palma variam entre 0,244 e 0,039, e os valores encontrados por Li variam entre 0,323 e 0,399.

O fato dos valores encontrados por Wang *et al* (2008) e Vital *et al* (2004) serem próximos aos encontrados por esse trabalho indica que o comportamento da serrapilheira nas florestas estudadas é similar. Já os valores encontrados por Li *et al* (2009) e Palma *et al* (1998) indicam que naquelas áreas o acúmulo de serrapilheira anual é maior que o encontrado na floresta de transição. Isso poderia ser explicado pelo clima das regiões onde foram feitos os estudos desses dois autores, pois tanto na Argentina como nos Estados Unidos, o clima é mais ameno que o encontrado na região amazônica, o que poderia significar segundo a literatura uma diminuição na atividade decompositora principalmente advinda de microorganismos, que se adaptam melhor a condições de climas mais quentes.

Neste contexto os valores de K apresentados por este estudo, mostram-se realistas para o que acontece no ambiente, pois com esses valores de K o modelo pode reproduzir de forma bastante fiel a variação da serrapilheira no período estudado.

Com os resultados de K obtidos para cada caixa, foi possível elaborar o intervalo de confiança *bootstrap*, para a área de estudo. O gráfico a seguir apresenta o resultado do intervalo de confiança para a média do K gerado pelo programa Crystal Ball, com 10000 simulações usando os valores de K da Tabela 1 transformados em valores anuais.

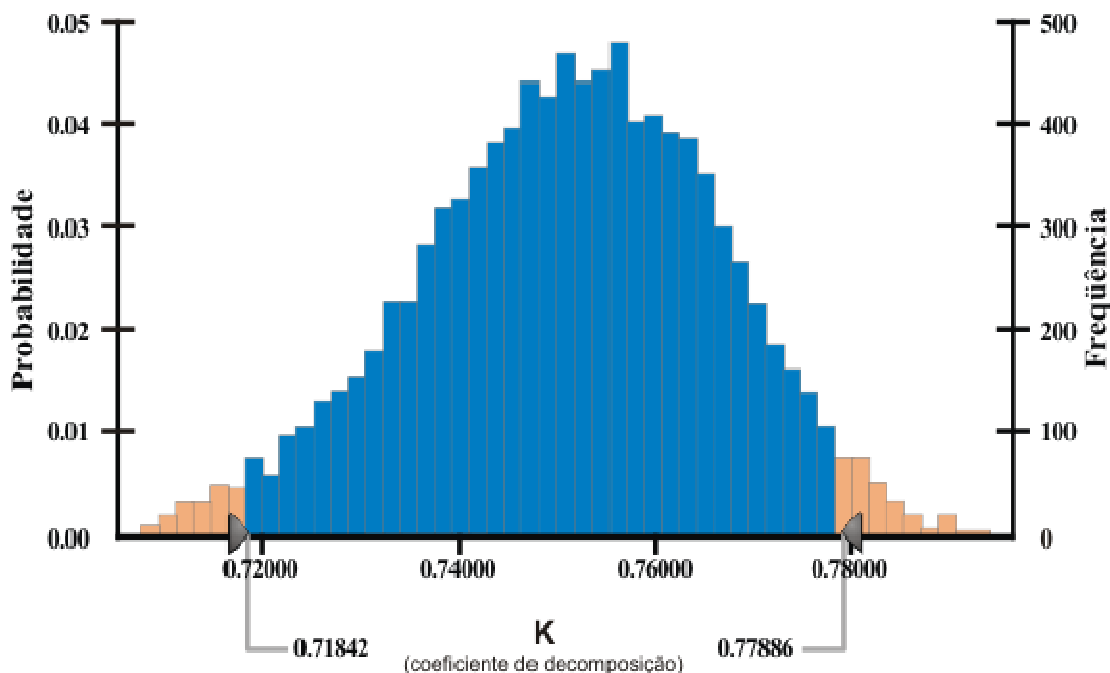


Figura 10 - Gráfico do intervalo de confiança bootstrap para as médias dos valores de K anual

Observa-se no gráfico que o intervalo de confiança ficou entre $0,71842 \text{ ano}^{-1}$ e $0,77886 \text{ ano}^{-1}$, respectivamente limite inferior e superior para as médias, com α de 5%. E as maiores frequências da média ficaram em torno de $0,758 \text{ ano}^{-1}$. Este intervalo de confiança é pequeno, pois a variação nele é de aproximadamente 6%, indicando a estabilidade do modelo proposto, e semelhanças na decomposição da serrapilheira.

Porém apesar do intervalo de confiança estreito e dos valores de K encontrados serem relativamente próximos entre si, o teste de Scherer-Ray-Hare (Tabela 2) indica que existem diferenças significativas no acúmulo de serrapilheira na região estudada, isso pode indicar que existem diferenças entre os diversos fatores que influenciam a decomposição da serrapilheira naquela região.

Com os valores de K ótimo para cada caixa e os valores de queda de serrapilheira também para cada caixa, é possível simular o acúmulo de serrapilheira no solo da floresta e confrontar os valores simulados com os observados em campo.

A figura a seguir mostra um gráfico confrontando médias dos valores simulados e observados de serrapilheira acumulada nos 43 meses do experimento.

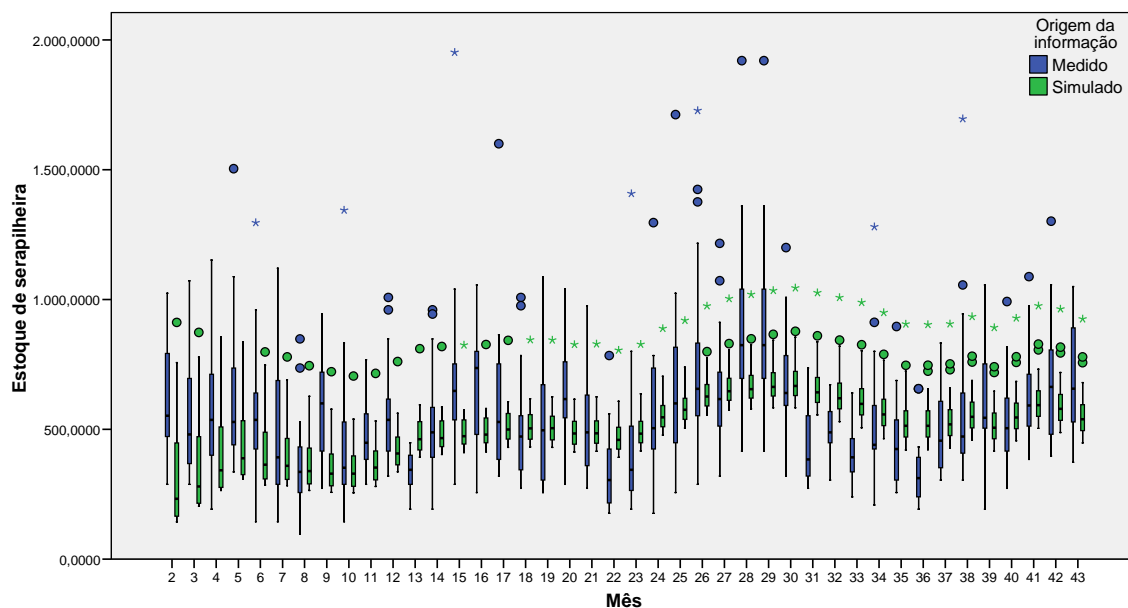


Figura 11 - Gráfico da serrapilheira acumulada simulada e medida por mês.

Nesse gráfico nota-se que em média o modelo reproduz a variação da serrapilheira dentro do período estudado, percebe-se através desse “boxplot” que apesar de mais estável o modelo acompanha as tendências da serrapilheira durante os anos do estudo. Pode se notar isso através da observação dos quartis dos valores simulados e medidos e também pela observação dos *outliers* de cada uma das series de dados.

A maior estabilidade do modelo frente aos dados coletados em campo pode ser explicada pelo fato de o modelo não levar em conta variáveis climáticas, e outras ocorrências naturais que geram grandes *outliers* como os vistos nos meses 28 e 29, por exemplo. Esses *outliers* freqüentemente causados por eventos aleatórios como a queda de uma árvore ou de um grande galho devido a uma forte rajada de ventos, são difíceis de prever, no entanto poderiam ser adicionados ao modelo posteriormente de modo a melhorar a simulação.

5 CONCLUSÕES

Através do estudo realizado pôde-se concluir que o modelo proposto simula de forma realista como a decomposição acontece na floresta da serrapilheira, utilizando o modelo do decaimento radioativo assim como o proposto por Olson (1963), de tal forma que a equação diferencial que rege o modelo do decaimento foi suficiente para relacionar as causas e efeitos associadas à decomposição da serrapilheira.

Como o modelo por decaimento sozinho se mostrou suficiente para simular o que acontece no solo da floresta de transição, não foi necessário o estabelecimento de nenhuma equação empírica para auxiliar nessa simulação.

Por fim com a realização do intervalo de confiança, chegou-se a um valor de K médio de $0,758 \text{ ano}^{-1}$ com os limites inferior e superior sendo $0,71842 \text{ ano}^{-1}$ e $0,77886 \text{ ano}^{-1}$. E pela constatação do valor médio foi possível concluir que cerca de 25% do material que se acumula no solo da floresta não é decomposto, indicando assim um estoque permanente no solo da mesma.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir desse trabalho, vários outros poderão ser desenvolvidos dando origem a artigos e eventualmente outras dissertações e teses, algumas sugestões de trabalhos futuros que dariam continuidade ao trabalho começado aqui seriam:

- Estudo de fatores que afetam o coeficiente de decomposição, adicionando assim ao modelo, outras variáveis que ajudariam a melhorar seu ajuste com relação aos dados originais.
- Estudo de fatores que afetam a queda da serrapilheira, de forma a modelá-la para que então possam ser realizadas a criação e o estudo de cenários futuros do processo na floresta.
- Fracionar a queda da serrapilheira por idade da mesma e/ou por tipo de serrapilheira para identificar diferentes velocidades de decomposição e eventualmente diferenças nos valores de K de acordo com o tempo de decomposição e tipo de serrapilheira.
- Usar princípios geoestatísticos para modelar espacialmente a decomposição de serrapilheira, fazendo com que o modelo simule as variações espaciais na decomposição da serrapilheira.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADUAN, R. E. **Respiração de solos e ciclagem de carbono em cerrado nativo e pastagem no Brasil central**. 130p. Tese (Doutorado) UNB, Brasília, 2003.

ALHAMD, L.; ARAKAKI, S.; HAGIARA, A. Decomposition of leaf litter of four tree species in a subtropical evergreen broad-leaved forest, Okinawa Island, Japan. **Forest Ecology and Management**, v. 202, 1–11 2004.

ARATO, H, D.; MARTINS, S. V., FERRARI, S. H. S. Produção e decomposição de serrapilheira em um sistema agroflorestal implantado para recuperação de área degradada em Viçosa - MG. **Revista Árvore**, v.27, n 5, p.715-721, 2003.

BAMBI, P. **Variação sazonal do índice de área foliar e sua contribuição na composição da serrapilheira e ciclagem de nutrientes na floresta de transição no norte do Mato Grosso**. 99p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2007.

COÛTEAUX, M. M.; BOTTNER, P.; BJORN, B. litter decomposition, climate and litter quality. **Tree**. v. 3, 1995.

DIAS, H. C. T. & OLIVEIRA-FILHO, A. T. Variação temporal e espacial da produção de serrapilheira em uma área de floresta estacional semidecídua Montana em Lavras-MG. **Revista Árvore**, v.21, 11-26, 1997.

EFRON, B, Bootstrap methods: another look at the jackknife. **The annals of statistics**. v.7 n.1. 1-26. Jan 1979.

EWEL, J.T. Litter fall and leaf decomposition in a tropical forest succession in eastern Guatemala. **The journal of ecology**. Londres, Inglaterra, v. 64 n.1. 293-308. Mar 1976.

HENEGHAN, L.; COLEMAN, D. C.; ZOU, X.; CROSSLEY JR, D. A.; HAINES, B. L. Soil microarthropod community structure and litter decomposition dynamics: A study of tropical and temperate sites. **Applied Soil Ecology**, n 9, 33-38, 1998.

KING, R. F.; DROMPH, K. M.; BARDGETT, R. D. Changes in species evenness of litter have no effect on decomposition process. **Soil Biology e Biochemistry**, v. 34, 1959-1963, 2002.

KOUKOURA, Z.; MAMOLOS, A. P.; KALBURTJI, K. L. Decomposition of dominant plant species litter in a semi-arid grassland. **Applied Soil Ecology**. 23, 13-23, 2003.

KUMADA, S.; KAWANISHI, T.; HAYASHI, Y.; OGOMORI, K.; KOBAYASHI, Y.; TAKAHASHI, N.; SAITO, M.; HAMANO, H.; KOJIMA, T.; YAMADA, K. Litter carbon analysis in forests in an arid ecosystem with a model incorporating the physical removal of litter. **Ecological Modelling**. v. 215 n. 1. 190-199. Abr 2008

LEITÃO-FILHO, H. F.; PAGANO, S. N.; CESAR, O.; TIMONI, J. L. 7 RUEDA, J. J. **Ecologia de mata atlântica em Cubatão, SP**. EDUNESP/EDUNICAMP, São Paulo, 1993.

LI, Q.; MOORHEAD, D.L.; DEFOREST, J.L.; HENDERSON, R.; CHEN, J.; JENSEN, R. Mixed litter decomposition in a managed Missouri Ozark forest ecosystem. **Forest Ecology and Management**. v. 257 n.1. 688-694. 2009

LOUZADA, M. A. P.; QUINTELA, M. F. S. & PENNA. L. P. S. Estudo comparativo da produção de serrapilheira em áreas de mata atlântica: a floresta secundária “antiga” e uma floresta secundária (capoeira). **In: ESTEVES, F. A. Oecologia Brasiliensis**. Rio de Janeiro: UFRJ, 61-74, 1995.

MANLY, B.F.J. **Randomization, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology**. 3ª edição. Boca Raton, Flórida. Estados Unidos da America. Chapman & Hall / CRC Press. 2007. 455p.

MASON, C. F. **Decomposição**. Coleção Temas de Biologia, São Paulo: E.P.U, v. 18, 1980, 63p.

MELO, J. T. DE; RESCK, D. V. S. **Retorno ao solo de nutrientes de serrapilheira de *Eucalyptus cloziana* no cerrado do Distrito Federal.** Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados. p.16, 2003.

MIRANDA, E.J.; VOURLITIS, J.L; FILHO, N.P.; PRIANTE, P.C.; CAMPELO JUNIOR, J.H.; SULI, G.S.; FRITZEN, C.L.; LOBO, F. de A.; SHIRAIWA, S. Seasonal variation in the leaf gas exchange of tropical forest trees in the rain forest-savanna transition of the southern Amazon Basin. **Journal of Tropical Ecology.** 21: 451-460, 2005.

MONTAGNINI, F.; JORDAN, C. F. Reciclaje de nutrientes. In: GUARIGUATA, M. R.; KATTAN, G. H. (Eds.). **Ecologia y conservación de bisques neotropicais.** Catargo Ediciones LUR, 167-191, 2002.

OLSON, J.S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. **Ecology.** v.44 n. 2. 322-331. Abr 1963

PALMA, R.M.; PRAUSE, J.; FONTANIVE, A.V.;JIMENEZ, M.P. Litter fall and litter decomposition in a forest of the Parque Chaqueño Argentino **Forest Ecology and Management.** v. 106 n.1 205-210. 1998.

PRIANTE, F. N., HAYASHI, M. S., NOGUEIRA, J. S., CAMPELO JR., J. H., NUNES, P. C., SOUZA, L. S., COUTO, E. G. HOEGER, W., RAITER, F., TRIENWEILER, J. L., MIRANDA, E. J., PRIANTE, P. C., PEREIRA, L. C., BIUDES, M. S., FRITZEN, C. L., LACERDA, M., SULI, G. S., SHIRAIWA, S., SILVEIRA, M., VOURLITIS, G. L. Comparison of the mass and energy exchange of a pasture and mature transitional tropical forest of the southern amazon basin during the wet-dry season transition. **Global Change Biology.** 10: 863-876, 2004.

PRINGLE, L. **Ecologia: a ciência da sobrevivência.** Rio de Janeiro: biblioteca do exército. 1997. 52p.

RICHARDS, P.W. **The tropical rain forest.** Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 575p.

RODRIGUES, R. R. & LEITÃO FILHO, H. F. **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2ª edição, São Paulo: Fapesp, 320p., 2001.

SHIFLET, A.B; SHIFLET, G.W. **Introduction to computational science: modeling and simulations for the sciences**. New Jersey, Estados Unidos da América Princeton University Press. 2007.553p.

SIEGEL, S.; CASTELLAN JUNIOR, J.N. **Estatística não-Paramétrica para Ciências do Comportamento**. 2ª edição. São Paulo, Brasil. Editora Artmed. 2006. 448p.

SOKAL, R.R.; ROHLF, F.J. **Biometry**, The principles and practice of statistics in biological research. 3ª edição, Nova York, Estados Unidos da América. W.H. Freeman and Company. 1997. 887p

SPOADOR, J. **Incidência, Transmitância, Refletância e Fração absorvida da radiação fotossinteticamente ativa em uma Floresta de transição Cerrado-Amazônica**. 47p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) - UFMT, Cuiabá, 2005.

VALENTINI, C. M. A. **Efluxo de CO₂ do solo em uma área de floresta de transição no noroeste de Mato-Grosso**. 81p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente), UFMT, Cuiabá, 2004.

VENTANA Systems Inc. **Vensim Modeling Guide: manual de modelagem**, 2008. 66p

VITAL, A. R. T., GUERRINI, I. A., FRANKEN, W. K., FONSECA, R. C. B., Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma floresta estacional semidecidual em zona ripária. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n 6, 793-800, 2004.

WANG, Q.; WANG, S.; HUANG, Y. Comparisons of litterfall, litter decomposition and nutrient return in a monoculture *Cunninghamia lanceolata* and mixed stand in southern China. **Forest Ecology and Management**. v. 255 n.1 1210-1218. 2008

ZOUBIR, A.M.; BOASHASH, B. The bootstrap and its applications in signal processing. **IEEE Signal processing magazine**. v.15. n. 1. 56-76. Jan 2007.