

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE O ESTADO DO RIO GRANDE DO  
SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA**

**ANÁLISE DE MODELOS MATEMÁTICOS DE DECOMPOSIÇÃO DA  
SERAPILHEIRA**

**Elaborada por**

**MÔNICA GIACOMINI**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Ijuí-RS, Julho de 2006**

**MÔNICA GIACOMINI**

**ANÁLISE DE MODELOS MATEMÁTICOS DE DECOMPOSIÇÃO DA  
SERAPILHEIRA**

Dissertação apresentada ao Departamento de Física, Estatística e Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ – (RS) como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Matemática, sob a orientação do Prof. Dr. Geraldo Ceni Coelho e Co-orientação do Prof. Dr. Pedro Augusto Pereira Borges.

Ijuí-RS, Julho de 2006

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE O ESTADO DO RIO GRANDE DO  
SUL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**ANÁLISE DE MODELOS MATEMÁTICOS DE DECOMPOSIÇÃO DA  
SERAPILHEIRA**

Elaborada por

**MÔNICA GIACOMINI**

Como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Matemática

Comissão Examinadora

---

Prof. Dr. Geraldo Ceni Coelho - (Orientador) UNIJUI

---

Prof. Dr. Pedro Augusto Pereira Borges – (Co-Orientador) UNIJUI

---

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>a</sup> Rosana Victória Higa – EMBRAPA/PR

---

Prof. Dr. Gilmar de Oliveira Veloso - UNIJUI

Ijuí-RS, 07 de Julho de 2006

## **AGRADECIMENTOS**

*A Deus, pela oportunidade de conquistar mais esta etapa. Obrigado por estar sempre ao meu lado em todos os momentos da minha vida, protegendo e iluminando o meu caminho.*

*Aos meus pais, Realdo e Noemia, pelo amor, paciência, dedicação, incentivo, carinho e por permanecerem sempre ao meu lado.*

*Ao meu irmão Laerte e a minha cunhada Silvana pela ajuda, apoio, incentivo, exemplo, força e carinho.*

*Ao Professor orientador Dr. Geraldo C. Coelho pela orientação, paciência e disponibilidade durante o desenvolvimento desta pesquisa.*

*Ao Professor co-orientador Dr. Pedro A. P. Borges, pelas orientações, ensinamentos, ajuda e compreensão durante a realização desta pesquisa.*

*Aos professores da Graduação e do mestrado pelos momentos compartilhados e pelos conhecimentos transmitidos.*

*Aos funcionários do DBQ - Departamento de Biologia e Química; e as funcionárias do DeFEM - Departamento de Física, Estatística e Matemática, em especial*

*a Geni pela dedicação e disponibilidade nos momentos em que precisei.*

*A todos os colegas de curso, em especial a Angela pela compreensão e pelos momentos vividos.*

*A todas as pessoas que não foram mencionadas e que de alguma forma auxiliaram na realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.*

## RESUMO

Os nutrientes necessários às plantas são oriundos da decomposição do material de origem do solo e outros contidos na matéria orgânica, acima e abaixo da superfície do solo, incluindo a serapilheira. O estudo da decomposição da serapilheira é de grande interesse para pesquisas em sistemas agro-florestais e agrícolas, considerando este um dos mais importantes compartimentos da ciclagem de nutrientes. A decomposição da serapilheira em função do tempo apresenta um comportamento exponencial, com uma rápida decomposição na fase inicial, seguida de uma decomposição mais lenta. Em função da temperatura, a decomposição da serapilheira apresenta um comportamento parabólico. Neste trabalho foram desenvolvidas: 1. análise de modelos matemáticos para a decomposição da serapilheira em função do tempo, considerando três modelos propostos para o decaimento do fator de decomposição ( $k$ ); 2. análise de modelos matemáticos para a decomposição da serapilheira em função do tempo e da temperatura. Para o trabalho de ajuste das curvas de regressão, foram testados os métodos de ajuste de curva linear e não linear. Para o ajuste linear usou-se o método dos mínimos quadrados e para o ajuste não linear o método de Newton. Os ajustes para a decomposição da serapilheira em função do tempo com os modelos para o fator de decomposição apresentaram uma boa tendência aos dados experimentais. De um modo geral, o modelo de decaimento exponencial com um valor assintótico para o fator de decomposição ( $k_{\infty}$ ) apresenta o melhor ajuste, superior ao do modelo que considera  $k$  constante. Dentre os modelos matemáticos propostos para a decomposição da serapilheira em função do tempo e da temperatura, o modelo denominado exponencial parabólico linear apresentou melhor ajuste aos dados experimentais, e melhor coerência com o sentido físico e biológico do processo de decomposição da serapilheira.

## ABSTRACT

The nutrients required by the plants are originated from the matrix rocks and the organic matter, over and under the soil, including the litter. The study of the litter decomposition is an interesting theme, concerning the research on the agriculture and agro forestry, since the litter is one of the most important compartments of the nutrient cycle. The litter mass decay as a function of the time presents an exponential aspect, with a fast initial phase followed by a slow phase. As a function of temperature, the litter mass decay presents a parabolic feature. This work present 1. analysis of mathematical models of the litter decay as a function of the time, considering three different models to the decomposition factor ( $k$ ) and 2. analysis of mathematical models of the litter decay as a function of time and temperature. The linear and non-linear adjustment methods were tested to the experimental and literature data. Least square method was used to the linear adjust and Newton method was performed to the non-linear adjust. As a general tendency, the exponential decay model with an asymptotic value of the decay factor ( $k_{\infty}$ ) presented the best fitting, higher than the model with a constant value of the  $k$ . Among the mathematical models proposed to the litter decay as a function of time and temperature, the model named linear parabolic exponential presented the best fitting to the data, and the best coherence with the physical and biological nature of the process.

# SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	IV
<b>RESUMO</b> .....	VI
<b>ABSTRACT</b> .....	VII
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	X
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	XII
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	XIII
<b>1. Introdução</b> .....	1
<b>2. Revisão Bibliográfica</b> .....	5
2.1. O ecossistema e os nutrientes .....	5
2.2. O seqüestro de carbono (C) .....	7
2.3. Ciclagem de nutrientes .....	9
2.4. Serapilheira.....	11
2.5. Fatores que afetam a decomposição da serapilheira (k) .....	14
2.6. Modelos matemáticos sobre a decomposição da serapilheira .....	17
2.7. O problema proposto .....	21
<b>3. Material e Métodos</b> .....	23
3.1. Ajuste linear.....	24
3.2. O erro quadrático e o coeficiente de determinação .....	27
3.3. Ajuste não linear.....	28
3.3.1. Caso linearizável .....	28
3.3.2. Caso não linearizável.....	29



3.4. Exemplo de um ajuste linear e não linear.....	32
<b>4. Descrição de Modelos Matemáticos que descrevem o Comportamento da Decomposição da Serapilheira em Função do Tempo .....</b>	<b>33</b>
4.1. Dados experimentais e o fator de decomposição.....	33
4.2. Descrição dos modelos matemáticos da decomposição da serapilheira.....	36
<b>5. Modelos Matemáticos que descrevem o Comportamento da Decomposição da Serapilheira em Função do Tempo e da Temperatura Ambiente.....</b>	<b>38</b>
5.1. Modelos matemáticos propostos para análise da influência do tempo e da temperatura ambiente na decomposição da serapilheira .....	38
5.1.1. Modelo exponencial parabólico linear .....	41
5.1.2. Modelo parabólico.....	42
5.1.3. Modelo multiplicativo .....	43
5.1.4. Modelo exponencial parabólico não linear.....	43
<b>6. Simulação e Análise dos Resultados .....</b>	<b>45</b>
6.1. Simulações dos modelos matemáticos propostos para os fatores de decomposição da serapilheira em função do tempo.....	45
6.2. Simulações dos modelos matemáticos propostos para a decomposição da serapilheira em função do tempo e da temperatura ambiente.....	54
<b>7. Conclusões .....</b>	<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>63</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$X$	massa remanescente de serapilheira ( $g$ )
$L$	taxa de variação anual da matéria orgânica morta ( $g/dia$ )
$k$	fator de decomposição ( $1/dia$ )
$t$	tempo ( $dias$ )
$T$	temperatura ( $^{\circ}C$ )
$a, b, p, q$	parâmetros de ajuste
$dX/dt$	taxa de variação da serapilheira em um intervalo de tempo
$X_0$	massa inicial ( $g$ )
$X_{\infty}$	massa recalcitrante de serapilheira, que não se decompõe ( $g$ )
$k_0$	fator de decomposição no primeiro intervalo de tempo de coleta dos dados ( $1/dia$ )
$k_{\infty}$	fator de decomposição estacionário, quando $t$ tende ao infinito ( $1/dia$ )
$\varepsilon^2$	erro quadrático
$Y_i$	vetor dos dados calculados $y_i = f(x_i)$
$\hat{Y}_i$	vetor dos dados experimentais
$J(x_i)$	matriz Jacobiana
$x^*$	uma das soluções do sistema não linear
$\varepsilon$	precisão $X(t, T)$
$R^2$	coeficiente de correlação
$k_c$	fator de decomposição constante ( $1/dia$ )
$k_{vp}$	fator de decomposição variável como uma função potência ( $1/dia$ )
$k_{ve}$	fator de decomposição variável como uma função exponencial ( $1/dia$ )
$X(t)$	massa remanescente de serapilheira em função do tempo ( $g$ )

$X(t,T)$	massa remanescente de serapilheira em função do tempo e temperatura (g)
$\partial X/\partial T$	taxa de decomposição da serapilheira em função da temperatura (g/°C)
$\nabla X(t,T)$	gradiente da função massa remanescente
$g(T)$	constante de integração dependente da temperatura (°C)
$A(t), B(t), C(t)$	parâmetros de ajuste que dependem do tempo

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Dados da decomposição da serapilheira da aroeira periquita ( <i>Schinus molle L.</i> ) (Cherobini <i>et al.</i> , 2005).....	34
Tabela 4.2	Dados da decomposição da serapilheira da palha de cevada (Paustian <i>et al.</i> , 1997).....	35
Tabela 4.3	Dados da decomposição da serapilheira da raiz de trevo (Paustian <i>et al.</i> , 1997).....	35
Tabela 4.4	Dados da decomposição da serapilheira da acícula do pinheiro escocês (Paustian <i>et al.</i> , 1997).....	36
Tabela 4.5	Modelos matemáticos para a decomposição da serapilheira com as equações propostas para o fator de decomposição.....	37
Tabela 5.1	Dados da decomposição da serapilheira de faia (%) em função do tempo e da temperatura ambiente (Pöhhacker and Zech, 1995).....	38
Tabela 6.1	Parâmetros de cada modelo proposto para o fator de decomposição e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para as quatro coleções dos dados experimentais do fator de decomposição.....	49
Tabela 6.2	Parâmetros de cada modelo proposto para a decomposição da serapilheira e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para as quatro coleções dos dados experimentais da decomposição da serapilheira.....	52
Tabela 6.3	Coefficientes de determinação ( $R^2$ ) dos modelos matemáticos propostos para os dados da decomposição da serapilheira de faia em função do tempo e da temperatura ambiente (Pöhhacker and Zeck, 1995).....	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Processos de transferência (ciclagem) de nutrientes minerais em sistemas naturais (adaptado de Coelho, 2003).....	10
Figura 3.1	Ajuste linear e não linear dos dados experimentais da decomposição da serapilheira da aroeira periquita em função do tempo (Cherobini <i>et al.</i> , 2005).....	32
Figura 5.1	Dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função do tempo (Pöhhacker and Zech, 1995).....	39
Figura 5.2	Dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função da temperatura (Pöhhacker and Zech, 1995).....	40
Figura 6.1	Ajustes de curvas dos modelos propostos para o fator de decomposição considerando os dados experimentais da decomposição da serapilheira da aroeira periquita ( <i>Schinus molle L.</i> ) (Cherobini <i>et al.</i> , 2005).....	46
Figura 6.2	Ajustes de curvas dos modelos propostos para o fator de decomposição considerando os dados experimentais da decomposição da serapilheira da acícula de pinheiro escocês (Paustian <i>et al.</i> , 1997).....	47
Figura 6.3	Ajustes de curvas dos modelos propostos para o fator de decomposição considerando os dados experimentais da decomposição da serapilheira da palha de cevada (Paustian <i>et al.</i> , 1997).....	47
Figura 6.4	Ajustes de curvas dos modelos propostos para o fator de decomposição considerando os dados experimentais da decomposição de serapilheira da raiz de trevo (Paustian <i>et al.</i> , 1997).....	48
Figura 6.5	Ajustes de curvas dos modelos matemáticos para a decomposição da serapilheira, considerando os dados experimentais da serapilheira da aroeira periquita (Cherobini <i>et al.</i> , 2005).....	50

Figura 6.6	Ajustes de curvas dos modelos matemáticos para a decomposição da serapilheira, considerando os dados experimentais da serapilheira da acícula de pinheiro escocês (Paustian <i>et al.</i> , 1997).....	51
Figura 6.7	Ajustes de curvas dos modelos matemáticos para a decomposição da serapilheira, considerando os dados experimentais da serapilheira da palha de cevada (Paustian <i>et al.</i> , 1997).....	51
Figura 6.8	Ajustes de curvas dos modelos matemáticos para a decomposição da serapilheira, considerando os dados experimentais da serapilheira da raiz de trevo (Paustian <i>et al.</i> , 1997).....	52
Figura 6.9	Ajuste com o modelo exponencial parabólico linear para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função do tempo e da temperatura ambiente (Pöhhacker and zeck, 1995).....	54
Figura 6.10	Ajuste com o modelo exponencial parabólico linear para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função da temperatura ambiente (Pöhhacker and Zech, 1995).....	55
Figura 6.11	Ajuste com o modelo exponencial parabólico não linear para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função do tempo e da temperatura ambiente (Pöhhacker and zeck, 1995).....	56
Figura 6.12	Ajuste com o modelo exponencial parabólico não linear para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função da temperatura ambiente (Pöhhacker and Zech, 1995).....	56
Figura 6.13	Ajuste com o modelo parabólico para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função do tempo e da temperatura ambiente (Pöhhacker and zeck, 1995).....	57
Figura 6.14	Ajuste com o modelo parabólico para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função da temperatura ambiente (Pöhhacker and Zech, 1995).....	58

- Figura 6.15 Ajuste com o modelo multiplicativo para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função do tempo e da temperatura ambiente (Pöhhacker and zeck, 1995).....59
- Figura 6.16 Ajuste com o modelo multiplicativo para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função da temperatura ambiente (Pöhhacker and Zech, 1995).....59

## 1. Introdução

As florestas são consideradas os recursos naturais mais importantes para a humanidade, porque fornecem diversos bens e serviços úteis ao homem e ao equilíbrio ambiental do planeta, tais como: madeira, alimentos, fibras, água limpa, proteção para a fauna e para o solo, contribui no equilíbrio do clima em escala global, além de fornecer lazer e belezas espetaculares ao homem contribuindo para o seu bem estar e para sua qualidade de vida.

Ao longo da história, o homem desenvolveu-se alicerçado no aproveitamento dos recursos naturais e, dentre esses, as florestas foram e continuam sendo a grande reserva econômica do desenvolvimento da população. As árvores representam fonte de abrigo, alimentação e garantia de sobrevivência.

No entanto, a ação desordenada, através de um permanente processo de desenvolvimento, alterou a cobertura original das florestas, tornando-a deficiente em todas as suas regiões.

Na agricultura, a floresta ocupa a tarefa insubstituível de reserva e regeneração. A manutenção permanente da produtividade dos solos nos ecossistemas está diretamente ligada às condições de preservação e ampliação das áreas com cobertura vegetal. Portanto entender como ocorre a decomposição do material orgânico é de fundamental importância para a aplicação de métodos de recuperação de áreas degradadas e de solos que apresentam fraca produtividade agrícola e contribui também para os estudos do seqüestro do carbono.

O rápido crescimento da população exigiu um maior e mais intenso uso das florestas e de seus produtos, tornando-os escassos e pouco disponíveis no mercado. Essa crescente demanda está forçando um uso mais intensivo do solo com o objetivo de aumentar a disponibilidade de produtos de origem florestal e outros. No entanto, tem-se que considerar que o solo não é apenas um suporte físico para o crescimento das plantas e armazenamento de umidade e nutrientes. O solo é um sistema dinâmico que abriga uma multiplicidade de organismos com características e funções diferentes, os quais proporcionam o equilíbrio ambiental indispensável para o desenvolvimento de todos os seres vivos.



Assim, um importante desafio hoje é recuperar estas áreas degradadas, tornando-as novamente produtivas e encontrar alternativas para evitar que este processo destrutivo ocorra em outros locais ainda cobertos por florestas, e promover a ordem da produção para garantir um rendimento estável e contínuo nas propriedades, sem esquecer de preservar e ampliar as áreas com florestas.

Os nutrientes necessários às plantas são oriundos da decomposição do material de origem do solo e de outros que estão contidos na matéria orgânica, acima e abaixo da superfície do solo. Todos os elementos minerais liberados do solo estão sujeitos à ação de lixiviação. A lixiviação é responsável pela diminuição do potencial nutritivo de solos velhos e intemperizados.

Nos ecossistemas formados por florestas naturais há um equilíbrio entre a decomposição de matéria orgânica e a retirada de nutrientes, já que não há extração por colheita nem maiores perdas por lixiviação ou erosão.

Da quantidade de nutrientes retirados anualmente do solo, uma parte volta ao chão em forma de detritos e uma menor parte volta ao chão pela lixiviação e certa parte permanece incorporada na própria árvore onde estão em curto prazo às frações dos detritos e da lixiviação sujeitas à recirculação.

Em longo prazo, toda ou parte da fração da árvore também entra no círculo, conforme os estados atuais da floresta, intacta ou parcialmente explorada. A parte que entra na circulação varia com o elemento, a espécie e a sua idade.

Os nutrientes que retornam ao solo são novamente fontes de nutrição. A sua decomposição ou acumulação influi muito na continuidade de abastecimento. A serapilheira ou *litter* compreende um reservatório apreciável de nutrientes. A devolução de nutrientes, através da queda da serapilheira, representa a via mais importante do ciclo biogeoquímico, isto em solos desgastados e intemperizados, onde os vegetais são as principais fontes de nutrientes. Dependendo das características do solo e da espécie, a quantidade de nutrientes devolvidas via deposição da serapilheira serão variadas.

A massa de nutrientes acumulada na serapilheira e depositada sobre o solo aumenta das florestas tropicais para as de clima frio, principalmente devido à baixa atividade dos organismos decompositores, que são inibidos pelas baixas temperaturas.

Com a exploração e a conseqüente retirada de nutrientes, logicamente alteram-se as condições do ecossistema, e a produtividade no futuro, principalmente nas regiões tropicais e subtropicais que dependem exclusivamente do processo de circulação de nutrientes. Os nutrientes que retornam ao solo são novamente fonte de alimentação, e a sua decomposição influi muito na continuidade de abastecimento.

O estudo da decomposição da serapilheira tem diferentes abordagens: influência da natureza química da serapilheira na velocidade de decomposição, com ênfase no teor de lignina (Berg *et al.*, 2003; Berg *et al.*, 1996; Berg & Ekbohm, 1991); investigação sobre a ação dos microorganismos e invertebrados que atuam na decomposição (Ägren & Bossata, 1994; Cárcamo *et al.*, 2001; Hammel, 1997); no estudo das variáveis físicas tais como o tamanho das partículas e da superfície exposta à ação dos microorganismos, e da influência da temperatura e umidade (Austin & Vitousek, 2000; Coûteaux *et al.*, 2002; Trofymow *et al.*, 2002).

Vários fatores influenciam na decomposição da serapilheira. Este estudo prioriza a análise de modelos matemáticos que consideram a decomposição da serapilheira dependente do tempo, e de modelos que a consideram dependente da temperatura ambiente. Escolhemos o tempo e a temperatura, pois consideramos estes fatores importantes para a decomposição da serapilheira. O objetivo principal deste trabalho é analisar modelos matemáticos para a decomposição da serapilheira em função do tempo, e também em função do tempo e da temperatura ambiente concomitantemente.

A presente dissertação é composta por sete capítulos, onde:

No primeiro capítulo é apresentada uma introdução, enfatizando a importância das florestas e as medidas de proteção para se conservar o ciclo natural de recirculação dos nutrientes entre o solo e as plantas. É exposto o objetivo principal da pesquisa.

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica, onde são apresentados os conceitos utilizados.

No terceiro capítulo é feito um estudo sobre ajuste de curva linear e não linear.

No quarto capítulo são apresentados modelos matemáticos para descrever o comportamento da decomposição da serapilheira em função do tempo, considerando o fator

de decomposição: constante, variável como uma função potência e variável como uma função exponencial.

No quinto capítulo são propostos modelos matemáticos para descrever a decomposição da serapilheira com influência do tempo e da temperatura ambiente.

No sexto capítulo são apresentadas as simulações dos modelos matemáticos e suas respectivas análises.

No sétimo capítulo são apresentadas às conclusões.

## 2. Revisão Bibliográfica

A produção de serapilheira e a devolução de nutrientes em ecossistemas florestais constituem a via mais importante do fluxo de nutriente no sistema solo-planta-solo e, juntamente com a circulação de nutrientes no interior da planta, permite que as árvores da floresta possam sintetizar a matéria orgânica através da fotossíntese.

A queda das folhas é causada pela senescência, resultante de uma série de processos metabólicos ligados à fisiologia de cada espécie, e também pelos estímulos vindos do ambiente, como temperatura, estresse hídrico etc.

A serapilheira é particularmente importante por atuar na superfície do solo como um sistema de entrada e saída de nutrientes suprindo o solo e as raízes com matéria orgânica, sendo essencial na restauração da fertilidade do solo em áreas em início de degradação. Desta forma, a serapilheira torna-se um dos mais intensos sítios de interação entre a ciclagem de elementos químicos inorgânicos e a transferência de energia, condicionando a capacidade de produção do ecossistema.

### 2.1. O ecossistema e os nutrientes

Um ecossistema é um sistema processador de energia e regenerador de nutrientes que tem duas partes principais, uma biótica e outra abiótica. As partes biótica e abiótica trocam energia e materiais. Em termos simples, todos os ecossistemas consistem de três componentes básicos: os produtores, os consumidores (incluindo decompositores) e a matéria inorgânica e orgânica (Smith *et al.*, 1996).

De um ponto de vista biológico, um ecossistema é composto por substâncias inorgânicas ( $C$ ,  $N$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,...) envolvidas nos ciclos de materiais; compostos orgânicos (proteínas, carboidratos, lipídios, substâncias húmicas,...) que ligam o biótico e o abiótico; ar, água e substrato, incluindo o regime climático e outros fatores físicos; organismos produtores, os autotróficos, que são as plantas verdes, que manufacturam o alimento a partir de substâncias inorgânicas simples; organismos macroconsumidores, os heterotróficos, que são os animais,

que ingerem outros organismos ou matéria orgânica particulada; organismos microconsumidores, chamados saprófitos, heterotróficos ou decompositores, que são as bactérias e os fungos que obtêm a sua energia degradando tecidos mortos ou absorvendo matéria orgânica extraída de plantas ou de outros organismos (Golley *et al.*, 1978).

A quantidade de nutrientes em um ecossistema florestal é representada pela somatória de nutrientes contida nos diferentes compartimentos da biomassa arbórea (folhas, casca, ramos, lenho,...), vegetação do sub-bosque, serapilheira e solo (Poggiani & Schumacher, 2000).

As florestas tropicais são caracterizadas como ecossistemas com grande produção de biomassa, um grande reservatório de nutrientes minerais e que apresenta rápida ciclagem entre os componentes orgânicos e o substrato. A biomassa significa massa de matéria de origem biológica, viva ou morta, animal ou vegetal. E o termo biomassa florestal é toda a biomassa existente na floresta ou a fração arbórea da mesma (Golley *et al.*, 1978).

A manutenção do estoque de nutrientes minerais no solo, bem como da produtividade de biomassa das florestas de rápido crescimento, está ligada com o processo da ciclagem de nutrientes. O processo de ciclagem de nutrientes nos ecossistemas florestais pode ser caracterizado como ciclo geoquímico, biogeoquímico e bioquímico. A planta, pelo seu sistema radicular, retira os elementos minerais do solo para a produção da biomassa (folhas, ramos, casca, madeira e raízes) e posteriormente devolve parte destes elementos por meio da queda de resíduos orgânicos, os quais, à medida que vão sendo mineralizadas, novamente são absorvidos pelas raízes (Poggiani, 1985).

A degradação dos ecossistemas pode decorrer da utilização dos recursos naturais pelo homem, ocorrendo em tal intensidade que próximo de 13% da superfície da terra encontram-se como áreas degradadas (Oldeman & Lynden, 1998). Nos trópicos, são apontadas como causas de degradação às atividades relacionadas com o desmatamento, o manejo inadequado na agricultura, o superpastejo, a exploração extrativista da vegetação para a produção de energia e madeira para as serrarias (Parrotta *et al.*, 1997; Oldeman & Lynden, 1998).

A regeneração natural de florestas tropicais são muitas vezes lenta e incerta em virtude da combinação de fatores, como: a dominância de gramíneas, a recorrência das

queimadas, as condições microclimáticas desfavoráveis, a baixa fertilidade dos solos e o esgotamento do banco de sementes (Parrotta *et al.*, 1997).

## 2.2. O seqüestro de carbono (C)

O conceito de seqüestro de carbono (C) foi consagrado na Conferência de Kyoto, em 1997, com o objetivo de conter e reverter o acúmulo de  $CO_2$  na atmosfera para reduzir o efeito estufa. Em princípio, seqüestro de carbono aplica-se desde a preservação de áreas florestais com riscos de ser destruída, a recuperação de florestas degradadas, e ao estabelecimento de novas plantações florestais até sistemas agro-florestais com espécies nativas ou exóticas (Yu, 2004).

O Brasil se destaca no cenário mundial por compreender 40% das florestas tropicais do mundo. Um dos maiores depósitos de carbono no mundo está na Floresta Amazônica não perturbada, estocado na forma de madeira (Sanquetta, 2002).

O seqüestro de carbono vegetal constitui o processo de crescimento das plantas, quanto maior é o porte das plantas mais biomassa se acumula e conseqüentemente mais carbono é fixado, sendo as plantas responsáveis por um estoque de 500 Gt (Gigatonelada) de carbono. Entre todo o reino vegetal, as florestas proporcionam o mais longo estoque do ciclo do carbono, em forma de madeira e acumulação no solo por centenas de anos antes de retornar a atmosfera através da respiração, decomposição, erosão ou queima. Portanto, as florestas, incluindo o solo, estocam dois terços do carbono na superfície terrestre (Larcher, 2000).

Um estoque que está absorvendo carbono é chamado de poço (*sink*) e um estoque que estiver liberando carbono é chamado de fonte (*source*). Assim, áreas florestadas são consideradas como poços de carbono (*carbon sinks*) (Totten, 2000) e florestas derrubadas como fonte de carbono (IPCC, 2000).

O seqüestro  $CO_2$  da atmosfera pela fotossíntese é usado e fixado para a construção de tecidos das plantas, os tecidos poucos duráveis, como folhas e cascas e tecidos duráveis como a madeira. A madeira consiste de duas substâncias básicas: a celulose e a lignina, as quais contem moléculas baseadas em carbono, moléculas estas de alta durabilidade. Os

tecidos não-duráveis logo são decompostos e o carbono vai sendo liberado para a atmosfera em forma de CO<sub>2</sub> (Yu, 2004).

As plantas através da fotossíntese capturam o carbono da atmosfera estocando-o em forma de biomassa viva. O seqüestro florestal de carbono é o fluxo entre a atmosfera e os ecossistemas terrestres, o que corresponde à primeira etapa da formação dos combustíveis fósseis, que são biomassas submersas e decompostas durante as formações geológicas de longa escala temporal, como: carvão, gás e petróleo. A queima dos combustíveis fósseis é responsável por mais de 80% das emissões de carbono no mundo (Totten, 2000).

No Brasil a grande parte das emissões de gases provém dos desmatamentos (75%) principalmente na Amazônia, o que eleva o percentual de emissões do Brasil para 2,5% da emissão mundial (Viola, 2002).

Segundo Houghton (1994) o aumento do carbono na atmosfera é em função das emissões de CO<sub>2</sub> a partir da queima de combustíveis fósseis, mudança do uso da terra e absorção de CO<sub>2</sub> pelos oceanos e pelos ecossistemas terrestres. Portanto a grande preocupação da sociedade científica em geral é de que mudanças possam vir a ocorrer provocada por está alteração climática e que do ponto de vista quantitativo, o CO<sub>2</sub> é o mais importante gás causador do chamado efeito estufa.

Soluções para que sejam retardados os efeitos que o aquecimento global possa vir a provocar, foram debatidos na Conference on Global Warning and Climate Change, que segundo Tata (1988) são: diminuir as emissões atmosféricas de carbono (CO<sub>2</sub>) pela queima de florestas e promover o plantio e reflorestamento em larga escala.

As florestas possuem uma elevada taxa de crescimento e, portanto tem uma grande capacidade de remover o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da atmosfera com isso têm sido apontadas como drenos do dióxido de carbono através do processo da fotossíntese, que em uma fase posterior armazena-o em diferentes componentes da biomassa do ecossistema (Reis *et al.*, 1994).

### 2.3. Ciclagem de nutrientes

No processo de ciclagem, ocorre a transferência de nutrientes de um compartimento para outro envolvendo uma série de processos dentro de um ou mais ciclos naturais: geoquímico, biogeoquímico e bioquímico.

A produção de serapilheira representa a principal via de retorno de nutrientes e de matéria orgânica para o solo do ecossistema florestal. Segundo Proctor (1983), essa produção de serapilheira constitui um índice de produtividade da floresta.

O padrão de ciclagem de nutrientes nos trópicos úmidos é diferente do padrão de áreas temperadas. Nas regiões frias, uma grande parcela da matéria orgânica e dos nutrientes permanece no solo, enquanto que, nos trópicos, uma percentagem muito maior está na biomassa, sendo reciclada dentro das estruturas orgânicas do sistema. Além disso, a taxa de ciclagem, ou seja, a velocidade com que os nutrientes se movimentam entre e dentro dos compartimentos, é muito mais rápida numa floresta tropical do que em uma temperada (Odum, 1988).

O estudo da dinâmica da ciclagem de nutrientes de um determinado ecossistema envolve a medição da quantidade e velocidade de transferência de um dado elemento químico de um compartimento para outro. Portanto, são importantes tanto para preservação dos sistemas naturais e sua sustentabilidade, quanto para avaliação de impactos causados ao ambiente. A fragilidade do ecossistema pode ser entendida como o balanço de nutrientes e sua quantidade, destacando-se a eficiência da ciclagem, sendo que, em certos casos, a adubação deve ser utilizada para manter ou elevar a produtividade do sistema (Golley *et al.*, 1978).

O estudo dos processos que regulam as atividades do solo em ecossistemas naturais pode fornecer importantes informações sobre opções de manejo que mantenham a sua fertilidade em áreas de plantio. Sabe-se que as plantações florestais de rápido crescimento translocam intensamente os nutrientes contidos no solo para a fitomassa arbórea e para a serapilheira (Vieira, 1998).

O compartimento formado pela serapilheira e pelo solo é o sítio de todas as etapas da decomposição da matéria orgânica e da ciclagem de nutrientes. A vegetação é a principal



responsável pela variabilidade horizontal da serapilheira, ou seja, quanto mais diversa for à comunidade vegetal, mais heterogênea será a serapilheira (Correia & Andrade, 1999).

Tomamos neste trabalho como conceito de decomposição o processo de mineralização dos componentes da serapilheira que desta forma se transferem para o solo ou para atmosfera, ou ainda para os microorganismos. Desta maneira o processo de decomposição é caracterizado por uma perda de massa da serapilheira.

A Figura 2.1 ilustra os processos de transferência de nutrientes entre os diferentes compartimentos ecológicos de um ecossistema florestal.

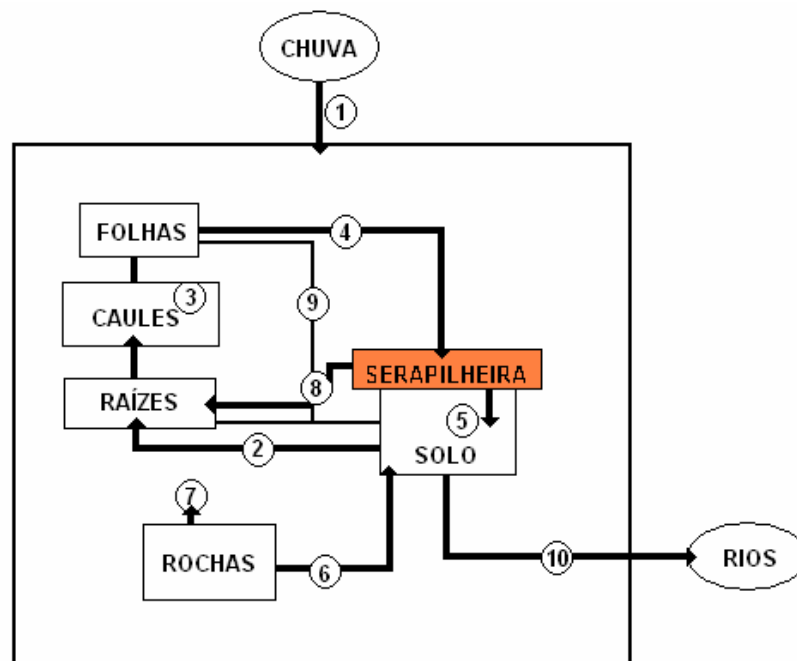


Figura 2.1 - Processos de transferência (ciclagem) de nutrientes minerais em sistemas naturais (adaptado de Coelho, 2003).

Definições dos processos:

1. Entrada de nutrientes através da chuva; importante para os elementos enxofre (S) e nitrogênio (N).
2. Absorção de nutrientes pelas plantas a partir do solo.
3. Transferência interna entre os subcompartimentos da planta.

4. Queda de folhas, ramos, flores e frutos para o solo, formando a serapilheira.
5. Transferência de nutrientes de serapilheira para o solo através da decomposição da matéria orgânica morta.
6. Solubilização dos componentes minerais da rocha matriz para o solo através de processos de intemperização.
7. Transferência direta das rochas para as raízes vegetais através da interferência de fungos endomicorrízicos.
8. Transferência direta da serapilheira para as raízes através da ação de micorrizas; importante em solos tropicais de baixa fertilidade e clima pluvial.
9. Transferência de nutrientes da parte aérea das plantas para o solo através da ação da chuva (lixiviação).
10. Perda de nutrientes dos ecossistemas terrestres para os ecossistemas aquáticos.

#### **2.4. Serapilheira**

Para Darnell (1967), serapilheira é todo o tipo de material biogênico em vários estágios de decomposição o qual representa uma fonte potencial de energia para as espécies consumidoras. A serapilheira é composta de folhas, ramos, caules, cascas, flores, frutos caídos e resíduos animais depositados sobre o solo (Aciesp, 1997; Golley *et al.*, 1978). A serapilheira sobre o solo produz sombra e retém umidade, criando condições microclimáticas que influenciam na germinação de sementes e estabelecimento de plântulas (Moraes *et al.*, 1998).

O conjunto serapilheira-solo representa uma fonte de carbono e energia para os organismos do solo, e também o habitat onde todas as ações dos organismos ocorrem, garantindo a sua sobrevivência e reprodução. A serapilheira é a porção mais dinâmica desse conjunto e a mais variável não só entre ecossistemas, mas também dentro de um mesmo ecossistema (Correia & Andrade, 1999).

Bray e Gorham (1964) concluíram, em uma revisão da literatura, que as serapilheiras amostradas em diferentes florestas do mundo, em geral, são compostas de 60 a 80% por folhas, de 1 a 15% por frutos, de 12 a 15% por ramos e de 1 a 25% por cascas de árvores. Poggiani *et al.* (1998), citam que cerca de 70% da serapilheira produzida por um talhão florestal jovem é composta por folhas denominada folheda. Segundo este autor o folheda corresponde à fração de folhas.

A concentração de nutrientes na serrapilheira de sistemas florestais naturais é bastante similar ao de florestas implantadas, ou seja, o nitrogênio é o nutriente em maior concentração, seguido pelo cálcio, potássio, magnésio e fósforo (Haag, 1985).

A serapilheira é a característica fundamental do solo florestal e contribui consideravelmente para as suas propriedades físicas e químicas. A camada de matéria orgânica em decomposição sobre o solo, com sua microflora característica e com sua fauna constitui a dinâmica do ambiente florestal. Grande parte dos restos vegetais e animais junto com a excreção misturam-se gradualmente com o solo mineral e, em interação com as partes subterrâneas das plantas, formam a fração orgânica do solo.

A equação (2.1) descreve, em condição estacionária, a quantidade de serapilheira em um ecossistema (Olson, 1963):

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

onde  $X$  é a quantidade de serapilheira existente sobre o solo ( $g$ )

$L$  taxa de queda da serapilheira em um intervalo de tempo ( $g/dia$ )

$k$  é o fator de decomposição ou decaimento da serapilheira ( $1/dia$ )

$dt$  é a taxa de variação da serapilheira em relação ao tempo ( $t$ )

Uma série de fatores, bióticos e abióticos, influencia na quantidade de serapilheira ( $L$ ). Dentre eles destacam-se: tipo de vegetação, estágio sucessional, latitude, altitude, temperatura, precipitação, herbivoria, disponibilidade hídrica e estoque de nutrientes do solo

(Portes *et al.*, 1996), umidade do solo (Burghouts *et al.*, 1994), o vento (Dias & Oliveira Filho, 1997) e a idade das árvores (Mason, 1980).

A queda anual de serapilheira ( $L$ ) é correlacionada com a: evapotranspiração anual, temperatura média anual, precipitação anual, evapotranspiração potencial, e área basal das árvores. Mas por outro lado não tem correlação com a latitude e com a idade de plantios florestais (Berg & Meentemeyer, 2001).

Para Mason (1980), a quantidade de serapilheira produzida aumenta com a idade até que a cobertura vegetal esteja fechada. O desbaste da cobertura causa um decréscimo na produção de serapilheira e a remoção constante dos resíduos florestais eventualmente diminui as adições na serapilheira, provavelmente porque o reservatório de nutrientes do solo torna-se empobrecido.

A quantidade de serapilheira depositada também pode variar dentro de um mesmo tipo de vegetação, dependendo dos graus de perturbação das áreas. Áreas com grau de perturbação maior acabam produzindo maior quantidade de serapilheira do que em áreas menos perturbadas (Martins & Rodrigues, 1999). Essas perturbações são causadas pelos fatores abióticos como o vento, as chuvas e os animais do meio.

A acumulação de material orgânico na superfície dos solos florestais é função da quantidade de material que se acumula menos à taxa de decomposição. Porém a taxa de decomposição é afetada por fatores ambientais como: a natureza química e física dos tecidos, as condições de aeração, temperatura e umidade da serapilheira, e pelos tipos e quantidades de microflora e fauna existente.

A deposição de matéria orgânica aumenta das regiões frias para as regiões quentes e úmidas. Nas florestas tropicais úmidas as folhas e as flores ao caírem na superfície do solo sofrem um processo de decomposição rápido, com exceção das madeiras muito resistentes. Florestas situadas em regiões árticas ou alpinas, por exemplo, produzem, anualmente, cerca de uma tonelada por hectare de serapilheira; florestas temperadas frias, 3,5 toneladas e florestas equatoriais, cerca de 11 toneladas (Bray & Gorham, 1964).

## 2.5. Fatores que afetam a decomposição da serapilheira (*k*)

O processo de decomposição mantém a funcionalidade do ecossistema, possibilitando que parte do carbono incorporado na biomassa vegetal retorne a atmosfera como CO<sub>2</sub> e outra parte, juntamente com os elementos minerais, sejam incorporadas ao solo (Olson, 1963; Odum, 1969). Esse processo é regulado pela interação de três grupos de variáveis: as condições físico-químicas do ambiente, as quais são controladas pelo clima e pelas características edáficas do sítio; a qualidade (orgânica e nutricional) do substrato, que determina sua degradabilidade (Mellilo *et al.*, 1982; Taylor *et al.*, 1989), e a natureza da comunidade decompositora (macro e microrganismos) (Heal *et al.*, 1997; Correia & Andrade, 1999). A importância relativa de cada um desses três grupos de variáveis varia dentro e entre sítios, resultando em um sistema hierárquico de controle (Lavelle *et al.*, 1993).

A taxa de decomposição aumenta com a temperatura média anual, a pluviosidade mensal e a taxa de evapotranspiração (Upadhyay *et al.*, 1989; Berg, 2000). Ressalta-se que a taxa anual de evapotranspiração por sua vez está relacionada com a temperatura e a pluviosidade.

Berg & Staaf (1980) apresentaram um modelo sugerindo estágios de decomposição de serapilheira para o qual a decomposição de serapilheira nova de acículas de pinus é inicialmente dominada pelas concentrações de nutrientes da serapilheira (principalmente nitrogênio e fósforo) e uma fase mais tardia para o qual as taxas são reguladas pela concentração de lignina.

Tenney & Waksman (1929) avaliaram que as taxas de decomposição da matéria orgânica do solo são controladas por quatro fatores distintos: (1) a composição química do substrato, (2) o fornecimento suficiente de nitrogênio para os organismos decomponentes, (3) a natureza dos microrganismos envolvidos, e (4) condições ambientais, especialmente aeração, umidade suficiente, pH e temperatura.

Para Williams & Gray (1974) os fatores do meio que afetam os processos de decomposição são: temperatura, umidade e aeração do solo, pH e conteúdo de bases, conteúdo de matéria orgânica solúvel em água, conteúdo de nitrogênio e conteúdo de polifenóis presentes na serapilheira.

Os estudos realizados por Upadhyay & Singh (1985), McClaugherty *et al.*, (1985), Fogel & Cromack (1977), Aber & Melillo (1982) e Dyer (1986) demonstraram que a decomposição de serapilheira está relacionada primeiramente as propriedades físicas e químicas do material orgânico.

Nos estudos sobre o controle da qualidade de serapilheira através das taxas de decomposição têm enfatizado as concentrações de lignina (Fogel & Cromack, 1977) e concentrações de nitrogênio (Melin, 1928; Witkamp, 1966). Aber & Melillo (1980) discutiram a proporção de lignina para nitrogênio como um indicador superior e predisseram a decomposição de serapilheira num dado local. Além disso, um número de componentes químicos (Berg *et al.*, 1982) tem sido investigado para determinar seus papéis na dinâmica da decomposição.

Têm sido utilizados três métodos para estimar a decomposição da camada de serapilheira: a respiração do solo (que avalia a evolução do CO<sub>2</sub> produzido pela decomposição); a relação entre a quantidade de material que cai do dossel e a que está depositada sobre o solo; e avaliações diretas através de medidas da perda de massa em sacos denominados *litter bags* (Andrade, 1997).

O estudo da decomposição através da perda de massa em *litter bags* possui alguns inconvenientes que podem prejudicar a precisão dos resultados, como: os *litter bags* com tamanho de malha muito reduzido, podem excluir importantes organismos que participam do processo de decomposição; já os com malhas muito grandes, podem acarretar em uma alta perda de material no momento da coleta ou também permitir a entrada de uma fração nova de material, que não havia sido considerada na época da instalação (Andrade, 1997).

A diferença entre a serapilheira de diferentes espécies depende largamente do conteúdo de lignina nas folhas. A taxa de decomposição  $k$  (da equação (2.1)) é inversamente proporcional ao conteúdo de lignina (Austin & Vitousek, 2000), porém outros elementos químicos também podem influenciar positivamente ou negativamente o fator de decomposição  $k$ . Para Swift *et al.* (1979) a decomposição da serapilheira varia de acordo com a percentagem de lignina, polifenóis, carbono, nitrogênio, fósforo, enxofre e outros.

O valor  $k$  tem sido amplamente utilizado para avaliar a taxa de decomposição da serapilheira ou o tempo de renovação da serapilheira. Porém esta teoria só pode ser usada para ecossistemas que não atingiram o equilíbrio entre o material que cai e o material que é

decomposto (Anderson & Swift, 1983). Em ecossistemas florestais tropicais, os valores de  $k$  em geral são maiores do que  $l$  (Golley *et al.*, 1978), enquanto, em florestas de clima temperado, estes são menores do que  $l$ , podendo chegar a valores abaixo de  $0,1$  para florestas de coníferas.

Assumimos como conceito de manta orgânica todo o material orgânico em decomposição acumulado sobre o solo.

O ritmo de decomposição da manta orgânica pode ser muito rápido, variando de um a três anos em climas temperados e frios e até alguns meses nas regiões tropicais, considerando que a queda dos resíduos é muito uniforme entre as espécies que crescem em condições de climas similares. O processo de decomposição inicia antes mesmo dos resíduos vegetais se incorporarem a serapilheira, uma vez que a exudação das folhas possibilita a invasão de patógenos mesmo antes da sua queda, a qual é seguida do ataque de fungos tão logo chegue à superfície do solo (Mason, 1980).

Segundo Witkamp e Ausmus (1976) e Soma e Saito (1983), a macrofauna no solo é importante para o esgotamento da folha e rompimento da serapilheira, que favorece a instalação de bactérias e fungos e com o acréscimo eficaz da povoação da superfície, ocorre à fragmentação e trituração e, portanto possível aceleração da decomposição.

A temperatura é um importante fator para a decomposição da serapilheira, pois afeta a taxa de metabolismo dos organismos decomponentes. A velocidade de decomposição da serapilheira em floresta tropical é muito maior que nas áreas temperadas e não se encontra camada de serapilheira nos trópicos. As velocidades de decomposição em temperaturas de inverno são metades das de verão e o movimento do dióxido de carbono do solo é mais baixo antes do amanhecer e mais alto no meio da tarde (Witkamp, 1966).

Em termos de perda de peso do material, a microflora é responsável por 90% e a fauna por 10% da decomposição nos habitats terrestres (Mason, 1980).

A decomposição da serapilheira pode ser dividida em três processos básicos: lixiviação, intemperismo e ação biológica. A lixiviação é a perda rápida de material solúvel do detrito pela ação da água da chuva ou fluxo de água. Intemperismo é a ruptura mecânica dos detritos devidos a fatores físicos como fragmentação provocada pelo vento. A ação biológica resulta na fragmentação gradual e oxidação dos detritos por organismos vivos. Materiais em decomposição contem muitos compostos solúveis que são rapidamente

removidos pelo processo abiótico da lixiviação. A lixiviação ocorre durante toda a vida da planta devido aos efeitos da chuva, e quantidades substanciais de nutrientes penetram no solo de uma floresta, proveniente do dossel, durante a estação de crescimento das árvores.

## 2.6. Modelos matemáticos sobre a decomposição da serapilheira

Muitos estudos foram e continuam sendo realizados sobre a decomposição da serapilheira. Estudos feitos considerando a relação existente entre a taxa de decomposição e o tempo mostraram que o fator de decomposição ( $k$ ) poderia ser uma constante, de acordo com a equação (2.2), de Olson (1963):

$$\frac{dX}{dt} = -kX \quad (2.2)$$

onde  $X$  é a massa de serapilheira ( $g$ )

$k$  é o fator de decomposição em função do tempo ( $1/dia$ )

A resolução desta equação com  $k$  constante dá origem a uma função exponencial do tipo:

$$X(t) = X_0 e^{-kt} \quad (2.3)$$

onde  $X_0$  é a massa inicial ( $g$ )

Berg & Ekbohm (1991), apoiando-se no estudo de Howard & Howard (1974), adicionaram um valor assintótico à função exponencial, e que corresponde a uma fração de massa da serapilheira que não se decompõe (ou se decompõe a taxas desprezíveis no curto prazo), e que pode ser denominada de fração recalcitrante, de tal forma que:

$$ml = m(1 - e^{-kt/m}) \quad (2.4)$$

onde  $ml = \frac{(X_t - X_0) \times 100}{X_0}$ , é a perda de massa de serapilheira acumulada (%)



$m = X_0 - X_\infty$ , é a perda de massa de serapilheira acumulada máxima que pode ser alcançada (%)

$k$  é o fator de decomposição no início do decaimento

$X_\infty$  é a fração recalcitrante.

Por outro lado, admite-se que  $X_\infty$  também se decompõe embora a taxas muito baixas, conforme Coûteaux *et al.* (1998).

Os modelos acima consideram a serapilheira uniforme, portanto apresentando um coeficiente de decaimento ( $k$ ) único e constante. O pressuposto de que  $k$  é constante não é confirmado por estudos de campo e de laboratório (Janssen, 1984). Alternativamente, pode-se trabalhar com modelos que consideram que a matéria orgânica é formada de  $n$  componentes discretos, cada um apresentando um coeficiente de decomposição (modelo *quântico*, Middleburg 1989; Paustian *et al.*, 1997), onde:

$$\frac{dX}{dt} = -k_1X_1 - k_2X_2 - \dots - k_nX_n \quad (2.5)$$

Outra forma de abordar a heterogeneidade da serapilheira é considerar que a variação interna de componentes e suas respectivas reatividades (potencial de decomposição) são variáveis contínuas (modelo *continuum*), e  $k$  varia em função de tempo. Janssen (1984) e Middleburg (1989) propõem uma função potência para descrever a relação entre  $k$  e  $t$  onde:

$$k(t) = p(a+t)^{-q} \quad (2.6)$$

onde  $a$  é denominada a ‘idade inicial aparente’, e permite obter-se um valor de  $k$  para  $t=0$ .

Em Coelho & Borges (2005) foi mostrado que o fator de decomposição é variável em função do tempo e proposto um modelo exponencial dado pela equação (2.7), obtido com base em dados experimentais de duas espécies arbóreas (*T. micrantha* (L.) Blume e *Schinus molle* L.). A função escolhida deve-se à natureza da curva apresentada pelos dados experimentais no período de 240 dias, os quais apresentam uma forte decomposição nos primeiros 90 dias e uma tendência à estabilização em torno de um valor constante ( $k_\infty$ ) para valores finais do intervalo de tempo estudado. Para este estudo a função do tipo  $y = Ae^{-bx}$  mostrou-se inviável, pois a estabilização do valor de  $k$  para tempos grandes, exigiu a adição

do termo  $k_\infty$ , para garantir a tendência assintótica. Dessa forma a equação (2.7) ficou com somente um parâmetro ( $b$ ) para ser encontrado, cujo cálculo de  $b$  foi realizado pelo método dos mínimos quadrados.

$$k(t) = (k_o - k_\infty)e^{-bt} + k_\infty \quad (2.7)$$

onde  $k_o$  é o valor do fator de decomposição no primeiro mês de coleta de dados

$k_\infty$  é o valor do fator de decomposição estacionário (quando  $t$  tende a infinito)

$b$  é um parâmetro de ajuste.

O modelo utilizado por Coelho & Borges (2005) descreve a decomposição individual de cada porção de massa de serapilheira ( $X_i$ ), com valores variáveis do fator de decomposição, expresso pela equação (2.2).

O efeito da temperatura na decomposição da serapilheira é amplamente mostrado através de experimentos por Clark and Gilmour (1983); Kirschbaum (1994); O'Connell (1989); Coûteaux *et al.* (2002); Moore (1986); Walse *et al.*, (1998), e outros. Para Coûteaux *et al.* (2002) e Dálias *et al.* (2001) com temperatura em torno de 23°C ocorre a maior perda de massa e aumento das taxas de decomposição.

Coûteaux *et al.* (2002) estudou a decomposição de *pinus halepensis* em laboratório, em diferentes temperaturas, no período de 198 dias. Os valores para o fator de decomposição  $k$  foram expressos na forma da razão entre dois intervalos de temperaturas seqüentes, dados pela equação (2.8):

$$Q_{10} = \left( \frac{k_2}{k_1} \right)^{10/(T_2 - T_1)} \quad (2.8)$$

onde  $k_1$  e  $k_2$  são os fatores de decomposição dos períodos 1 e 2.

$Q_{10}$  é a razão entre os fatores de decomposição dos períodos 1 e 2, quando

$T_2 - T_1 = 10^\circ\text{C}$ .

Segundo Mason (1980) a velocidade de todas as reações químicas depende da temperatura, está relação é expressa pela equação (2.8), porém uma formulação mais precisa

da influência da temperatura sobre as velocidades de reação é obtida pela equação de Arrhenius:

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (2.9)$$

onde  $k$  é a constante de velocidade

$A$  é a constante relativa à frequência de colisões moleculares

$E_a$  é a energia de ativação

$R$  é a constante de gás  $8,30 \text{ J mol}^{-1}\text{k}^{-1}$

$T$  é a temperatura absoluta

Segundo Clark e Gilmour (1983) um dos fatores da decomposição de matéria orgânica é consequência de reações de microorganismos. A taxa de variação da concentração de microorganismos em relação à temperatura é proporcional,

$$\frac{dA}{dT} = kA \quad (2.10)$$

onde  $A$  é a quantidade de microorganismos.

$k$  é o fator de decomposição em função da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

Clark and Gilmour (1983) usaram a equação de Arrhenius modificada para descrever o fator de decomposição em função da temperatura,

$$k(T) = e^{(A/T)+B} \quad (2.11)$$

onde  $T$  é temperatura em ( $^{\circ}\text{C}$ )

$A$  e  $B$  são constantes

e O'Connell (1989) expressou o fator de decomposição através da equação (2.12):

$$k(T) = e^{\alpha+\beta T(1-0,5T/T_{opt})} \quad (2.12)$$

onde  $k$  é o fator de decomposição constante

$T$  é temperatura em ( $^{\circ}C$ )

$\alpha$  e  $\beta$  são constantes

$T_{opt}$  é a temperatura ótima para a decomposição ( $^{\circ}C$ )

Pöhhacker and Zeck (1995) realizaram experimentos para observar a decomposição da serapilheira de faia (*Fagus Sylvatica* L.) em função do tempo e da temperatura. Usaram quatro diferentes temperaturas e observaram a decomposição durante um período de 728 dias. A máxima perda de peso foi observada para a temperatura de  $22^{\circ}C$ . Neste trabalho foram utilizados os dados adquiridos por Pöhhacker and Zech (1995) e através destes dados foram propostos modelos matemáticos para descrever a tendência do fenômeno físico.

## 2.7. O problema proposto

A presente dissertação é uma pesquisa sobre a decomposição da serapilheira com o objetivo de estabelecer uma relação quantitativa (modelo matemático) entre a decomposição da serapilheira, o tempo e a temperatura ambiente.

Para elaborar tal modelo foi necessário verificar as dependências da decomposição em relação ao tempo e a temperatura, isoladamente, o que levou a abordagem do problema geral em três etapas:

1º) Análise da decomposição da serapilheira em função do tempo, equação (2.3), considerando o fator de decomposição ( $k$ ):

- constante;
- variável, conforme uma função potência;
- variável, conforme uma função exponencial.

2º) Análise da decomposição da serapilheira em relação à temperatura.

3º) Determinação de modelos matemáticos para a decomposição da serapilheira em função do tempo e da temperatura ambiente.

### 3. Material e Métodos

Os trabalhos experimentais que produzem dados sobre o comportamento de variáveis, geralmente objetivam a obtenção de funções matemáticas do tipo:

$$\hat{Y} = f(x_1, x_2, \dots, a_1, a_2, \dots) \quad (3.1)$$

onde  $\hat{Y}$  são os valores da variável dependente (função), obtidos matematicamente

$x_i$  são as variáveis dependentes e

$a_i$  são os parâmetros da função  $\hat{Y}$ .

Essas funções podem ser escolhidas com base em teorias (leis físicas, equações diferenciais,...) associadas à dispersão de pontos  $(x_i, y_i)$  obtidos experimentalmente, ou simplesmente propondo-se funções cuja tendência aproxime-se da tendência da dispersão. Alguns exemplos destas funções são as polinomiais, as exponenciais e logarítmicas (muito usadas nos problemas de crescimento em biologia), as hiperbólicas, etc. Escolhida a função o trabalho matemático passa a ser o desenvolvimento de métodos que possibilitem determinar os parâmetros  $a_i$  ótimos da função (3.1) em relação aos dados experimentais. Ou seja, determinar os parâmetros  $a_i$  tal que o erro  $\varepsilon = \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|$  seja mínimo, já que se o número de pontos disponíveis é maior do que o número de parâmetros a serem determinados é impossível encontrar parâmetros  $a_i$  tal que  $\varepsilon = 0$ .

A determinação dos parâmetros ótimos de uma função, para descrever a tendência de uma dispersão de pontos, é conhecida na literatura matemática como um problema de ajuste de curvas. O método dos mínimos quadrados é o método mais conhecido para ajustar curvas e será amplamente usado nessa dissertação. Por isso, considerou-se necessário fazer uma revisão de sua formulação na forma matricial, discutindo suas limitações para o ajuste de curvas não lineares, assim como de sua versão para o ajuste de funções de mais de uma variável.

### 3.1. Ajuste linear

Um ajuste linear simples dos pontos  $(x_i, y_i)$  consiste em encontrar os parâmetros de uma função linear

$$\hat{y} = a + bx \quad (3.2)$$

Substituindo  $(x_i, y_i)$  em (3.2), obtém-se um sistema de equações lineares, cujas incógnitas são os parâmetros  $a$  e  $b$ . Escritos na forma matricial, tomam a forma:

$$\begin{pmatrix} \hat{y}_1 \\ \vdots \\ \hat{y}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$$

ou

$$\hat{Y} = AX \quad (3.3)$$

O método dos mínimos quadrados consiste em determinar  $a$  e  $b$ , de tal forma que a soma do quadrado dos desvios ( $\varepsilon^2$ ) seja mínima:

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = (Y - \hat{Y})^T (Y - \hat{Y}) \quad (3.4)$$

onde  $Y$  é o vetor dos dados  $y_i$  e

$\hat{Y}$  é o vetor dos dados  $y$  calculados.

$T$  é a transposição do vetor.

$n$  é o número máximo de dados.

A minimização de  $\varepsilon^2$  consiste em encontrar o extremo inferior de  $\varepsilon^2$ . Para isso é necessário derivar  $\varepsilon^2$  em relação à  $a$  e  $b$ , igualar a zero e resolver o sistema resultante para estes parâmetros.

Então, substituindo (3.3) em (3.4), temos:

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = (Y - AX)^T (Y - AX) = \left[ \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a & bx_1 \\ \vdots & \vdots \\ a & bx_n \end{pmatrix} \right]^T \left[ \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a & bx_1 \\ \vdots & \vdots \\ a & bx_n \end{pmatrix} \right] =$$

$$\begin{bmatrix} y_1 - a - bx_1 & y_2 - a - bx_2 & \dots & y_n - a - bx_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 - a - bx_1 \\ y_2 - a - bx_2 \\ \vdots \\ y_n - a - bx_n \end{bmatrix}$$

Então obtém-se a equação (3.5):

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (3.5)$$

Derivando (2.3) em relação à  $a$  e  $b$  tem-se:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)x_i = 0$$

Montando um sistema com as derivadas e dividindo ambas por -2, temos:

$$\begin{cases} \sum y_i - \sum a - \sum bx_i = 0 \\ \sum x_i y_i - \sum ax_i - \sum bx_i^2 = 0 \end{cases}$$

ou

$$\begin{cases} \sum a + b \sum x_i = \sum y_i \\ a \sum x_i + b \sum x_i^2 = \sum x_i y_i \end{cases}$$

Considerando  $\sum a = a \sum_{i=1}^n 1 = an$ ,

$$\begin{cases} an + b \sum x_i = \sum y_i \\ a \sum x_i + b \sum x_i^2 = \sum x_i y_i \end{cases}$$



Escrevendo na forma matricial, tem-se a equação (3.6):

$$\begin{pmatrix} n & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Mas a primeira matriz da equação (3.6) corresponde a  $A^T A$  e o vetor do lado direito corresponde a  $A^T Y$ , então

$$A^T A = \begin{pmatrix} n & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad \text{e} \quad A^T Y = \begin{pmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Assim substituindo (3.7) em (3.6), tem-se as chamadas equações normais:

$$A^T A X = A^T Y \quad (3.8)$$

A matriz  $A^T A$  é quadrada e não singular, pois suas linhas são linearmente independentes, já que  $A$  é composta por valores de  $x_i$  diferentes entre si.

Resolvendo o sistema linear (3.8), chega-se à solução de mínimos quadrados que é única, pois  $A^T A$  não é singular o posto de  $A^T A$  é igual ao posto da matriz ampliada de (3.8)  $A^T A : A^T Y$ , que é quadrada. Assim,

$$\begin{aligned} (A^T A)^{-1} A^T A X &= (A^T A)^{-1} A^T Y \\ X &= (A^T A)^{-1} A^T Y \end{aligned} \quad (3.9)$$

onde  $X \begin{pmatrix} a & b \end{pmatrix}^T$  é a solução de (3.8), e  $a$  e  $b$  são os parâmetros que minimizam a soma dos erros ao quadrado.

O método descrito acima pode ser aplicado com sucesso para funções polinomiais de qualquer grau e até para funções lineares com mais de uma variável (ajuste múltiplo), ou seja, o método exposto pode ser aplicado se o sistema (3.8) é um sistema linear tendo os parâmetros como variáveis.

### 3.2. O erro quadrático e o coeficiente de determinação

A avaliação de um ajuste de curvas pode ser feito calculando o erro quadrático (desvio ( $\varepsilon^2$ )) ou pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ). O  $\varepsilon^2$  é a soma das diferenças ao quadrado entre o verdadeiro valor do parâmetro e o valor calculado a partir dos dados de uma amostra.

O erro quadrático é dado pela equação (3.10):

$$\varepsilon^2 = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.10)$$

onde  $y_i$  é o somatório dos dados experimentais dado pelo diagrama de dispersão.

$\hat{y}_i$  é o somatório dos dados calculados com a equação de ajuste.

Um bom ajuste de curva apresenta um valor para o  $\varepsilon^2$  bem próximo de zero.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ), dado pela equação (3.11), é uma medida de quanto a variável  $y$  (dependente) é descrita pela variável  $x$  (independente) considerando o modelo proposto. A variabilidade dos dados significa como  $y$  varia em relação à  $x$ . Neste caso, a variabilidade é o próprio modelo, pois quando é proposta uma função  $y(x)$  esta propondo uma variabilidade de  $y$  que depende de  $x$ . Assim pode-se dizer que o ( $R^2$ ) é um número que indica a adequação do modelo.

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_E}{SQ_T} \quad (3.11)$$

onde 
$$SQ_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$SQ_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$$

$$\bar{y}_i = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n}$$

O número  $R^2$  deve ficar entre  $0 \leq R^2 \leq 1$ . Segundo Montgomery e Runger (2003) se um ajuste apresentar um  $R^2 = 0,879$ , significa que o modelo explica 87,9% da variabilidade dos dados.

### 3.3. Ajuste não linear

O ajuste linear pode ser aplicado para algumas funções transcendentais, como a função exponencial, mediante algumas transformações, porém não é garantida a otimização dos parâmetros, conforme será mostrado a seguir.

#### 3.3.1. Caso linearizável

Seja um diagrama de dispersão  $(x_i, y_i)$  com  $i=1, 2, \dots, n \in N$ .

Se  $\hat{y}_i = f(x_i)$  é uma função não linear, para se aplicar o método dos mínimos quadrados, é necessário que a função seja linearizada, através de uma transformação conveniente.

Seja:

$$f(x) = y = ae^{bx} \quad (3.12)$$

Aplicando o logaritmo nos dois lados da igualdade, obtém-se:

$$\ln(y) = \ln(a) + bx \quad (3.13)$$

Denotando:

$$f_L(x) = \ln(y) \text{ e } \alpha = \ln(a) \quad (3.14)$$

tem-se a equação (3.15) linear nos parâmetros  $\alpha$  e  $b$ ,

$$f_L(x) = \alpha + bx \quad (3.15)$$

O método dos mínimos quadrados é aplicado na resolução do problema linearizado conforme descrito anteriormente. Obtidos os parâmetros deste problema, usam-se as relações de (3.14) para calcular os parâmetros originais.

É importante observar que os parâmetros assim obtidos não são ótimos dentro do critério dos mínimos quadrados, isto porque esta sendo feito o ajuste do problema linearizado por mínimos quadrados e não o problema original (Ruggiero e Lopes, 1996).

### 3.3.2. Caso não linearizável

Seja um diagrama de dispersão com pontos  $(x_{1i}, y_{2i}, \dots, x_{ki}, y_i)$  com  $k=1, 2, \dots, k \in N$  e  $i=1, 2, \dots, n \in N$ , onde  $x_k$  são os  $k$  variáveis independentes e  $y$  a variável dependente.

Seja  $\hat{y} = f(x_k, a_j)$  uma função definida em um conjunto  $D \subset \mathfrak{R}^n$ , e  $a_j$  são os parâmetros da função com  $j=1, 2, \dots, m \in N$  e está é não linear em relação a tais parâmetros.

Substituindo os valores de  $(x_{ki}, y_i)$  na função, analogamente ao caso linearizável, obtém-se, porém um sistema de equações não lineares que pode ser escrito na forma,

$$F = \begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) - y_1 = 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) - y_2 = 0 \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) - y_n = 0 \end{cases} \quad (3.16)$$

As funções  $f_i$  são também definidas em um conjunto  $D^* \subset \mathfrak{R}^n$  e precisam ter derivadas parciais contínuas em  $D^*$ , em relação a cada parâmetro  $a_j$ .

O problema de ajuste de curvas neste caso é encontrar um conjunto de parâmetros,

$$x^* (a_1, a_2, \dots, a_m)^T \quad (3.17)$$

tal que  $F(x^*) = 0$ .

Como (3.16) é um sistema não linear, então pode-se resolver por diferentes métodos numéricos (Gradientes Conjugados, Newton, Newton Modificado,...), porém neste trabalho foi escolhido o método de Newton, descrito a seguir.

O vetor das derivadas parciais da função  $f_i(a_1, a_2, \dots, a_m)$  é denominado vetor gradiente de  $f_i(a)$  e será denotado por  $\nabla f_i(a), i = 1, \dots, n$ :

$$\nabla f_i(a) = \left( \frac{\partial f_i(a)}{\partial a_1}, \frac{\partial f_i(a)}{\partial a_2}, \dots, \frac{\partial f_i(a)}{\partial a_m} \right)^T \quad (3.18)$$

A matriz das derivadas parciais de  $F(x_i)$  é chamada matriz Jacobiana e será denominada por  $J(a_j)$ :

$$J(a_j) = \begin{pmatrix} \nabla f_1(a)^T \\ \nabla f_2(a)^T \\ \vdots \\ \nabla f_n(a)^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1(a)}{\partial a_1} & \frac{\partial f_1(a)}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial f_1(a)}{\partial a_m} \\ \frac{\partial f_2(a)}{\partial a_1} & \frac{\partial f_2(a)}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial f_2(a)}{\partial a_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(a)}{\partial a_1} & \frac{\partial f_n(a)}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial f_n(a)}{\partial a_m} \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

Os métodos iterativos partem de um ponto inicial  $x^{(0)}$ , gerando uma seqüência  $\{x^{(p)}\}$  de vetores na situação de convergência:

$$\lim_{p \rightarrow \infty} x^{(p)} = x^*$$

onde  $x^*$  é uma das soluções do sistema não linear.

Todos os métodos iterativos para resolver sistemas de equações não lineares têm condições de convergência. Dependendo da escolha do ponto inicial e das características do sistema o método pode convergir para uma solução ou outra solução (se houver mais de uma) ou divergir.

Para qualquer método iterativo, é preciso estabelecer critérios de parada para se aceitar um ponto  $x^{(p)}$  como aproximação para a solução exata  $x^*$  ou para se detectar a divergência do processo.

Uma vez que na solução exata  $x^*$  tem-se  $F(x^*) = 0$ , um critério de parada consiste em verificar se todas as componentes de  $F(x^{(p)})$  têm módulo pequeno:

$$\|F(x^{(p)})\| < \varepsilon \quad (3.20)$$

onde  $\varepsilon$  é um número pequeno escolhido de acordo com a precisão desejada.

Outro critério de parada é verificar se  $\|x^{(p+1)} - x^{(p)}\|$  está próximo de zero, isto é,  $x^{(p+1)}$  é escolhido como aproximação para  $x^*$  se, por exemplo:

$$\|x^{(p+1)} - x^{(p)}\| < \varepsilon \quad (3.21)$$

O método de Newton consiste em partir de uma primeira aproximação  $x^{(0)}$ , melhorar esta aproximação usando a matriz jacobiana  $J(a_i)$ , dada pela equação (3.19).

Dados  $x_0, \varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0$  e  $p = 0$

Passo 1: calcule  $F(x_i^{(p)})$  e  $J(x_i^{(p)})$ .

Passo 2: se  $\|F(x^{(p)})\| < \varepsilon_1$ ,  $x^* = x^{(p)}$  vai para o passo 6; caso contrário:

Passo 3: obtenha  $s^{(p)}$ , solução do sistema linear:  $J(x_i^{(p)})s = -F(x_i^{(p)})$ ;

Passo 4: faça:  $x^{(p+1)} = x^{(p)} + s^{(p)}$ ;

Passo 5:  $p = p + 1$ ; volte ao passo 1.

Passo 6:  $x = x^*$

### 3.4. Exemplo de um ajuste linear e não linear

A Figura 3.1 apresenta a comparação do resultado entre um ajuste linear e um não linear, na qual foram utilizados os dados da decomposição de serapilheira da aroeira periquita em função do tempo.

O modelo matemático proposto para descrever a tendência dos dados experimentais é determinado pela equação (2.3), na qual  $X_0$  e  $k$  são os parâmetros de ajuste.

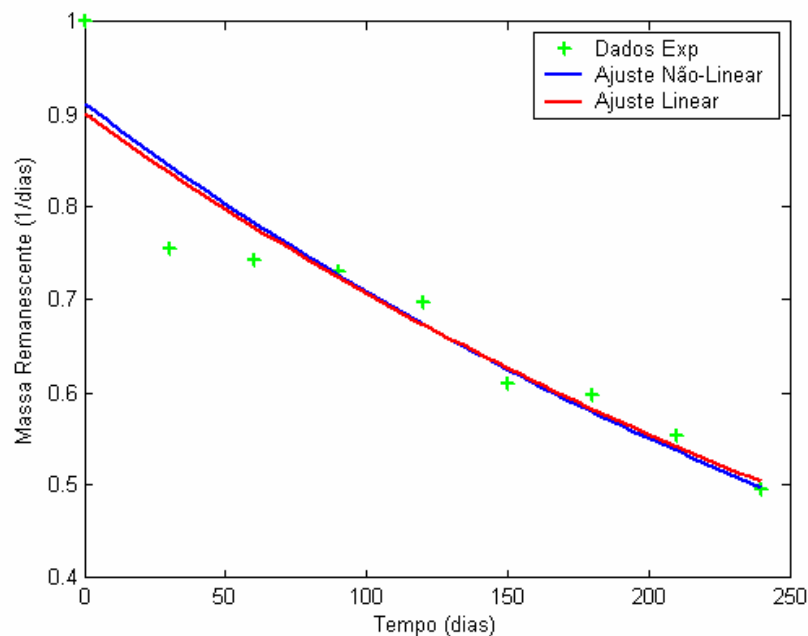


Figura 3.1 - Ajuste linear e não linear dos dados experimentais da decomposição de serapilheira da aroeira periquita em função do tempo (Cherobini *et al.*, 2005).

O coeficiente de determinação para ambos os ajustes apresentou valores bem próximos, para o ajuste linear obteve-se um  $R^2 = 0,8912$  e para o ajuste não linear  $R^2 = 0,8928$ . O ajuste não linear é melhor, porque as equações exponenciais e hiperbólicas (os modelos propostos para o fator de decomposição) não são lineares em relação aos parâmetros, nesse caso a linearização do modelo resulta em um ajuste não ótimo, pelo método dos mínimos quadrados. Porém existem casos em que o ajuste não linear não converge para a solução ótima do problema, pois depende muito da estimativa inicial.

## 4. Descrição de Modelos Matemáticos que descrevem o Comportamento da Decomposição da Serapilheira em Função do Tempo

O modelo matemático que descreve a decomposição da serapilheira, dada pela equação (2.2) em função do tempo foi analisado neste capítulo considerando o fator de decomposição: constante ( $k_c$ ), equação (2.2); variável de acordo com uma função potência ( $k_{vp}$ ), equação (2.6) e variável como função exponencial ( $k_{ve}$ ), equação (2.7).

Os dados experimentais sobre a decomposição da serapilheira em função do tempo utilizados neste trabalho são de Cherobini *et al.* (2005) e de Paustian *et al.* (1997).

### 4.1. Dados experimentais e o fator de decomposição

Os dados de Cherobini *et al.*, (2005), expostos na Tabela 4.1, foram coletados experimentalmente a campo. Esses dados são sobre a decomposição da serapilheira da espécie nativa aroeira periquita (*Schinus molle L.*), no qual foi utilizado o método *litter bags*. Os experimentos foram realizados no IRDeR - Instituto Regional de Desenvolvimento Rural/FIDENE, localizado no município de Augusto Pestana – RS (28° 26' 32'' Sul e 54° 00' 12'' Oeste). O solo é do tipo Latossolo Vermelho Distroférrico de textura argilosa.

Os dados experimentais de Paustian *et al.* (1997) descrevem a decomposição da serapilheira de três espécies diferentes: raiz de trevo, palha de cevada e acícula de pinheiro escocês. É importante ressaltar que a raiz de trevo não é considerada serapilheira, porém os dados foram usados para buscar a adequação dos modelos para a decomposição da matéria orgânica vegetal em geral.

Janssen (1984) propôs a equação (4.1) para descrever o fator de decomposição da massa de serapilheira em função do tempo.

$$k(t) = \frac{1}{\Delta t} \ln \left( \frac{X_0}{X_1} \right) \quad (4.1)$$



A equação (2.3) descreve o comportamento da decomposição da serapilheira em função do tempo, denotando  $X_0 = Igrama$  e resolvendo-a para  $k$ , tem-se:

$$k(t) = \frac{1}{t} \ln \left( \frac{I}{X(t)} \right) \quad (4.2)$$

A equação (4.1) determina o fator de decomposição para cada intervalo de tempo enquanto que a equação (4.2) calcula para cada tempo. Para intervalos de tempos menores os valores obtidos com a equação (4.2) tendem a se aproximarem dos valores obtidos com a equação (4.1).

A equação (4.2) calcula o fator de decomposição para cada ponto experimental, com exceção do primeiro valor de  $t$ , que é zero. Para este ponto foi escolhido um valor de  $k$  maior do que o segundo valor obtido.

A Tabela 4.1 apresenta os dados experimentais da decomposição de serapilheira da aroeira periquita de Cherobini *et al.* (2005).

Tabela 4.1 - Dados da decomposição da serapilheira da aroeira periquita (*Schinus molle L.*) (Cherobini *et al.*, 2005)

tempo (d)	X(t) massa (g)	$k=(1/t)\ln(I/X(t))$
0	1	0,01
30	0,7558	0,009333
60	0,7431	0,004949
90	0,73	0,003497
120	0,697	0,003008
150	0,6098	0,003297
180	0,598	0,002856
210	0,5536	0,002816
240	0,4959	0,002922

Os dados das Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 foram obtidos da literatura (Paustian *et al.*, 1997), referentes à decomposição da serapilheira de raiz de trevo, palha de cevada e acícula de pinheiro escocês (*Pinus sylvestris L.*). Os fatores de decomposição experimental foram calculados com a equação (4.2).

Tabela 4.2 - Dados da decomposição da serapilheira da palha de cevada (Paustian *et al.*, 1997)

tempo (d)	$X(t)$ massa (g)	$k=(1/t)\ln(1/X(t))$
0	1	0,01
187	0,95	0,000274
206	0,92	0,000404
206	0,92	0,000404
225	0,87	0,000619
225	0,89	0,000518
243	0,76	0,001126
300	0,65	0,001436
337	0,56	0,001718
375	0,51	0,001796
525	0,52	0,001246
600	0,45	0,001331
675	0,36	0,001514
731	0,37	0,001360

Tabela 4.3 - Dados da decomposição da serapilheira da raiz de trevo (Paustian *et al.*, 1997)

tempo (d)	$X(t)$ massa (g)	$k=(1/t)\ln(1/X(t))$
0	1	0,01
111	0,57	0,005061
222	0,26	0,006064
333	0,24	0,004283
425	0,21	0,003665
536	0,17	0,003301
703	0,21	0,002218
925	0,19	0,001794
1147	0,18	0,001494
1462	0,18	0,001173

Tabela 4.4 - Dados da decomposição da serapilheira da acícula de pinheiro escocês (Paustian *et al.*, 1997)

tempo (d)	$X(t)$ massa (g)	$k=(1/t)\ln(1/X(t))$
0	1	0,01
353	0,65	0,001219
562	0,62	0,000850
656	0,57	0,000857
731	0,53	0,000868
937	0,48	0,000783
1031	0,46	0,000753
1087	0,43	0,000776
1406	0,39	0,000670
1462	0,41	0,000610

#### 4.2. Descrição dos modelos matemáticos da decomposição da serapilheira

O modelo utilizado neste trabalho para a decomposição da serapilheira é descrito pela equação (2.2). Existem vários modelos matemáticos na literatura (Paustian *et al.*, 1997; Janssen, 1984; Middleburg, 1989; Berg *et al.*, 1996; Berg & Ekbohm, 1991). Neste trabalho foram selecionados três modelos para comparar a capacidade de descrição dos dados experimentais apresentados pelas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4: 1º modelo:  $k$  constante ( $k_c$ ); 2º modelo:  $k$  variável de acordo com uma função potência ( $k_{vp}$ ), descrito pela equação (2.6); e 3º modelo:  $k$  variável exponencial ( $k_{ve}$ ), descrito pela equação (2.7).

Para o primeiro modelo, equação (2.2), o parâmetro  $k$  foi obtido por ajuste não linear, usando o método de Newton, com uma precisão  $\varepsilon = 0,0001$ . E para os outros dois modelos, equação (2.6) e equação (2.7), os parâmetros  $p$ ,  $q$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $k_0$  e  $k_\infty$  também foram obtidos através de ajustes não lineares, usando o método de Newton. Os parâmetros ótimos para os três modelos estão expostos na Tabela 6.1.

Os modelos matemáticos que descrevem a decomposição de serapilheira, usando os diferentes modelos para o fator de decomposição são obtidos substituindo as expressões do fator de decomposição na equação (2.2) e integrando em relação ao tempo ( $t$ ). A Tabela 4.5 dá as equações de decomposição para cada modelo.

Tabela 4.5 – Modelos matemáticos para a decomposição da serapilheira com as equações propostas para o fator de decomposição.

Modelo 1	$X(t) = X_0 e^{-kt}$ (4.3)
Modelo 2	$X(t) = X_0 e^{\frac{p}{q}[(a+t)^{-q} - a^{-q}]}$ (4.4)
Modelo 3	$X(t) = X_0 e^{\frac{A}{b}(e^{-bt} - 1) - k_{\infty} t}$ (4.5)

## 5. Modelos Matemáticos que descrevem o Comportamento da Decomposição da Serapilheira em Função do Tempo e da Temperatura Ambiente

Neste capítulo são apresentados os quatro modelos matemáticos propostos para descrever a decomposição da serapilheira em função do tempo e da temperatura. Os modelos foram ajustados aos dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia (Pöhhacker and Zech, 1995) expostos na Tabela 5.1.

### 5.1. Modelos matemáticos propostos para análise da influência do tempo e da temperatura ambiente na decomposição da serapilheira

A Tabela 5.1 apresenta os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função do tempo e da temperatura ambiente (Pöhhacker and Zech, 1995).

Tabela 5.1 - Dados da decomposição da serapilheira de faia (%) em função do tempo e da temperatura ambiente (Pöhhacker and Zech, 1995).

Tempo ( <i>dias</i> ) \ Temperatura (°C)	5°C	12°C	22°C	32°C
0	100	100	100	100
33	98	96	91	88
90	92	84	83	84
180	87	79	74	79
365	82	74	61	69
728	81	70	52	68

As Figuras 5.1. e 5.2 ilustram os dados de Pöhhacker and Zech (1995). A análise do comportamento destes dados levou as seguintes observações:

1ª) A decomposição da serapilheira em função do tempo (Figura 5.1) confirma as tendências encontradas em outras pesquisas tais como Ägren and Bossata (2002); Janssen (1984); Paustian *et al.* (1997) e Cherobini *et al.* (2005), ou seja, a redução da massa apresenta

uma curva monótona, com taxas de decomposição maiores no início e menores no fim do processo.

2<sup>a</sup>) A temperatura tem forte influência na taxa de decomposição. Temperaturas em torno de 22°C determinam uma decomposição, inicial maior que nos extremos do intervalo estudado, além de intensificar-se no decorrer do tempo.

A primeira observação leva a propor modelos exponenciais ou hiperbólicos para a decomposição em função do tempo.

A segunda observação sugere a proposição de modelos de curvas com extremos (pontos de mínimo) no intervalo de temperatura entre 5 e 32°C.

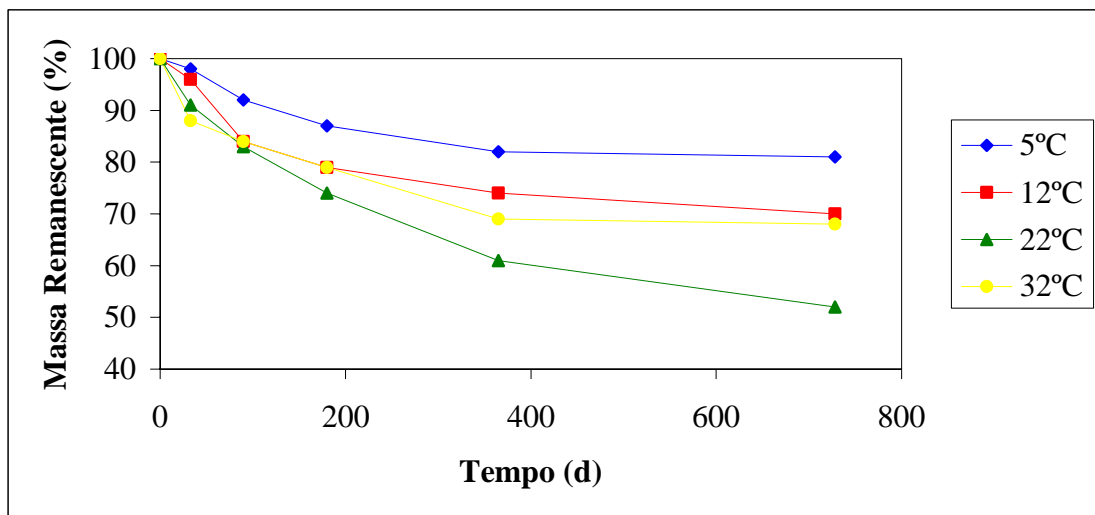


Figura 5.1 – Dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função do tempo (Pöhhacker and Zech, 1995).

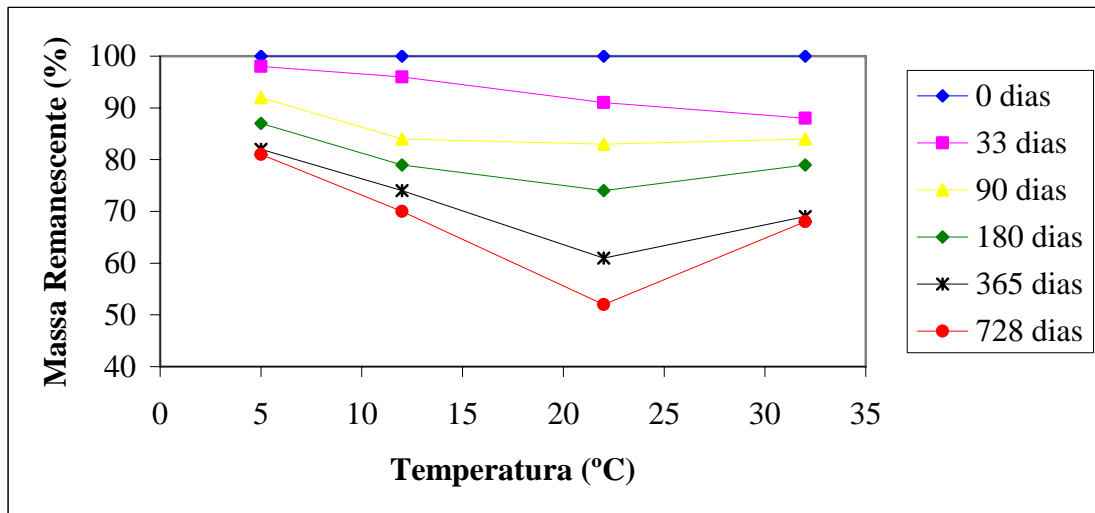


Figura 5.2 - Dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função da temperatura (Pöhhacker and Zech, 1995).

Considerando estes dados foram propostos e analisados os seguintes modelos matemáticos de funções  $X(t, T)$ :

- **Modelo exponencial parabólico linear:** as taxas de decomposição em relação ao tempo e temperatura são independentes uma da outra. A função  $X(t, T)$  é uma combinação linear das expressões destas taxas.

- **Modelo parabólico:** as curvas  $X(T)$  são parábolas cujos parâmetros variam em função do tempo.

- **Modelo multiplicativo:** consideram as dependências entre  $X$ ,  $t$  e  $T$  proporcionais à massa presente de serapilheira.

- **Modelo exponencial parabólico não linear:** considera a taxa de decomposição em relação ao tempo independente da temperatura e os parâmetros da relação parabólica de  $X$  com  $T$  dependentes do tempo.

### 5.1.1. Modelo exponencial parabólico linear

A taxa de decomposição da serapilheira em relação ao tempo neste modelo, é descrita conforme a equação diferencial (2.2). Esta proposição se justifica pelo evidente comportamento monótono, característico de funções exponenciais dos dados experimentais, mostrados na Figura 5.1. Destes dados, pode-se inferir também uma condição inicial do problema:

$$X(0) = X_o \quad (5.1)$$

onde  $X_o$  é a massa inicial de serapilheira.

A taxa de decomposição da serapilheira em relação à temperatura é descrita neste modelo como uma função linear da temperatura porque os dados experimentais sugerem a formação de parábolas para os valores da massa remanescente, para cada tempo medido:

$$\frac{\partial X}{\partial T} = k_1 T + k_2 \quad (5.2)$$

Para encontrar a função  $X(t, T)$  as equações (2.2) e (5.1) foram consideradas como as componentes do gradiente da função da massa remanescente,

$$\nabla X(t, T) = M(t)\vec{i} + N(T)\vec{j} \quad (5.3)$$

para

$$M(t) = -kX(t) \quad \text{e} \quad N(T) = k_1 T + k_2. \quad (5.4)$$

A condição necessária e suficiente para que (5.3) seja um gradiente da função  $X(t, T)$  é que  $\partial M / \partial T = \partial N / \partial t$  (Leithold, 1994). Neste caso,

$$\frac{\partial M}{\partial T} = \frac{\partial N}{\partial t} = 0$$

A equação (2.2) é facilmente resolvida com separação de variáveis e, depois de usada à condição inicial (5.1), tem como solução:

$$X(t, T) = X_o e^{-kt} + g(T) \quad (5.5)$$



A derivada de (5.5) em relação a  $T$  é igual à componente  $\partial N/\partial T$  do gradiente, então:

$$\frac{\partial X}{\partial T} = \frac{\partial N}{\partial T} = g'(T) = k_1 T + k_2 \quad (5.6)$$

Integrando (5.6) em relação a  $T$ , obtém-se:

$$g(T) = k_1 T^2 + k_2 T + k_3 \quad (5.7)$$

e substituindo  $g(T)$  em (5.5) obtém-se a função da Decomposição de serapilheira em função do tempo e da temperatura.

$$X(t, T) = X_0 e^{-kt} + k_1 T^2 + k_2 T + k_3 \quad (5.8)$$

### 5.1.2. Modelo parabólico

O modelo, chamado neste trabalho de parabólico, pressupõe que todas as curvas  $X(T)$  são parábolas, cujos parâmetros variam em função do tempo. É um modelo simples de ajuste de parâmetros, que não tem uma justificativa física-matemática forte, e apóia-se na própria geometria apresentada pelas tendências das curvas dos dados experimentais.

$$X(t, T) = A(t)T^2 + B(t)T + C(t) \quad (5.9)$$

Os parâmetros da função (5.9) foram calculados pelo Método dos Mínimos Quadrados (na forma matricial) para os dados de  $X$  referentes às 5 temperaturas disponíveis na Tabela 5.1, obtendo-se vetores de dados sobre cada parâmetro. Estes dados foram interpolados com polinômios de 4º grau,

$$A(t) = B(t) = C(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 \quad (5.10)$$

que determinam o valor de  $A(t)$ ,  $B(t)$  e  $C(t)$  para cada instante de tempo.

### 5.1.3. Modelo multiplicativo

O modelo multiplicativo considera as dependências entre  $X$ ,  $t$  e  $T$  proporcionais à massa presente de serapilheira.

$$X(t, T) = X_0 \exp(-ktT) \quad (5.11)$$

onde  $X_0$  é a massa inicial de serapilheira

Foi desenvolvido um ajuste não linear para encontrar o parâmetro  $k$  da equação (5.11), calculado através do Método de Newton, descrito no Capítulo 3, para os dados da decomposição de serapilheira em função  $t$  e  $T$ .

### 5.1.4. Modelo exponencial parabólico não linear

O modelo exponencial parabólico não linear pressupõe que a taxa de decomposição da serapilheira em relação ao tempo depende exponencialmente de  $t$ , mas se modifica com uma função linear que depende da temperatura  $T$ .

Para encontrar a função  $X(t, T)$  foi considerada que a  $\frac{\partial X}{\partial T}$  é linear e assume valores positivos e negativos, mas varia com o tempo. A  $X(T)$  tem a forma de uma parábola com um ponto de mínimo no domínio estudado, mas varia a concavidade em relação ao tempo. Com essas hipóteses foram propostas as seguintes funções,

$$M(t, T) = -kX_0 e^{-kt} + AT^2 + BT, \text{ e} \quad (5.12)$$

$$N(t, T) = (2AT + B)t \quad (5.13)$$

A condição necessária e suficiente para que (5.3) seja um gradiente da função  $X(t, T)$  é que  $\partial M / \partial T = \partial N / \partial t$  (Leithold, 1994). Neste caso,

$$\frac{\partial M}{\partial T} = \frac{\partial N}{\partial t} = 2AT + B$$

Integrando a equação (5.12) em relação a  $t$ , tem-se:

$$X(t, T) = X_0 e^{-kt} + (AT^2 + BT)t + g(T) \quad (5.14)$$

Observa-se que a constante  $g$  de integração é uma função de  $T$  e independente de  $t$ .

Derivando a equação (5.14) em relação a  $T$ , temos:

$$\frac{\partial X}{\partial T} = 2ATt + Bt + g'(T) \quad (5.15)$$

Igualando (5.13) e (5.15):

$$2ATt + Bt = 2ATt + Bt + g'(T) \quad (5.16)$$

Resolvendo,

$$g'(T) = 0$$

Portanto,

$$g(T) = C$$

Assim a equação (5.14) torna-se:

$$X(t, T) = X_0 e^{-kt} + (AT^2 + BT)t + C \quad (5.17)$$

Considerando a condição inicial  $X(0) = 0$  em (5.17) obtém-se que  $C = 0$ . Então, a função da Decomposição de serapilheira é:

$$X(t, T) = X_0 e^{-kt} + (AT^2 + BT)t \quad (5.18)$$

## 6. Simulação e Análise dos Resultados

Neste capítulo são apresentadas as simulações e análises dos modelos matemáticos propostos para a decomposição de serapilheira em função do tempo, descritos pelas equações (4.3), (4.4) e (4.5), considerando os dados experimentais da decomposição de serapilheira da aroeira periquita, da raiz de trevo, da palha de cevada e da acícula de pinheiro escocês, expostos nas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, respectivamente.

Também são apresentadas as simulações e análises dos modelos matemáticos propostos para a decomposição de serapilheira em função do tempo e da temperatura ambiente, descritos pelas equações (5.8), (5.9), (5.11) e (5.18), considerando os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia (Pöhhacker and Zeck, 1995), exposto na Tabela 5.1.

### 6.1. Simulações dos modelos matemáticos propostos para os fatores de decomposição da serapilheira em função do tempo.

As Figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4 apresentam às curvas de ajustes dos dados experimentais do fator de decomposição ( $k$ ), da aroeira periquita, da acícula de pinheiro escocês, da palha de cevada e da raiz de trevo considerando os três modelos propostos: o  $k$  constante ( $k_c$ ), o  $k$  variável potência ( $k_{vp}$ ) e o  $k$  variável exponencial ( $k_{ve}$ ). Os valores de  $k$  foram calculados pela equação (4.2) utilizando os dados experimentais mostrados nas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

Para o fator de decomposição constante ( $k_c$ ) foi proposto um valor médio dos fatores de decomposição dos dados experimentais da serapilheira de cada espécie. Para o fator de decomposição variável como uma função potência ( $k_{vp}$ ), equação (2.6), não foi possível desenvolver um ajuste não linear, pois não foi encontrada uma tentativa inicial que fizesse o método convergir para a solução ótima do problema, portanto foi desenvolvido um ajuste linear através da linearização do modelo, com isso os parâmetros de ajustes  $p$  e  $q$  não são considerados ótimos, como foi exposto no Capítulo 3. Para o fator de decomposição variável

como uma função exponencial ( $k_{ve}$ ), equação (2.7), foi desenvolvido um ajuste não linear através de um programa computacional próprio usando o Método de Newton, com o qual foi determinado os parâmetros ótimos do  $k_0$ ,  $k_\infty$  e  $b$ . Para os três ajustes descritos foi usada uma precisão de  $\varepsilon = 0,0001$ .

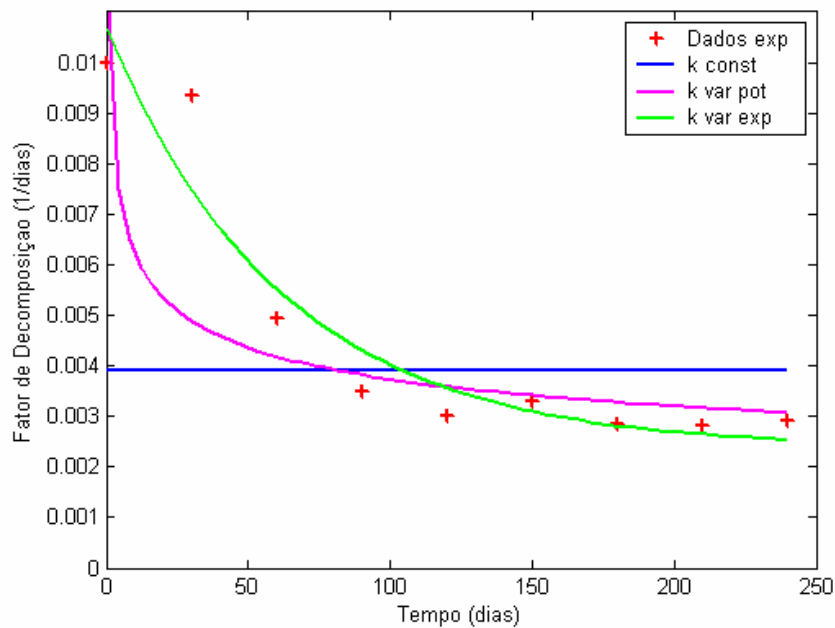


Figura 6.1 - Ajustes de curvas dos modelos propostos para o fator de decomposição considerando os dados experimentais da decomposição da serapilheira da aroeira periquita (*Schinus molle L.*) (Cherobini *et al.*, 2005).

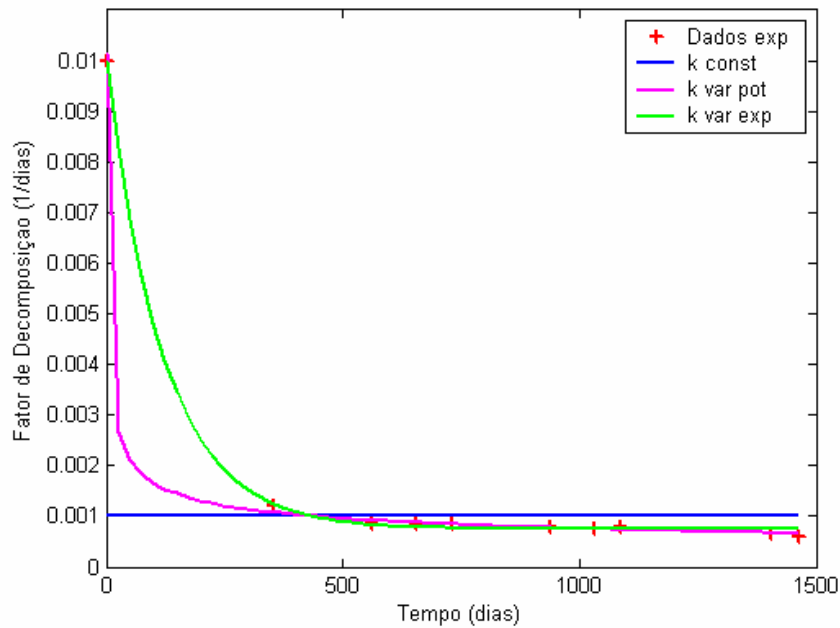


Figura 6.2 - Ajustes de curvas dos modelos propostos para o fator de decomposição considerando os dados experimentais da decomposição da serapilheira da acícula de pinheiro escocês (Paustian *et al.*, 1997).

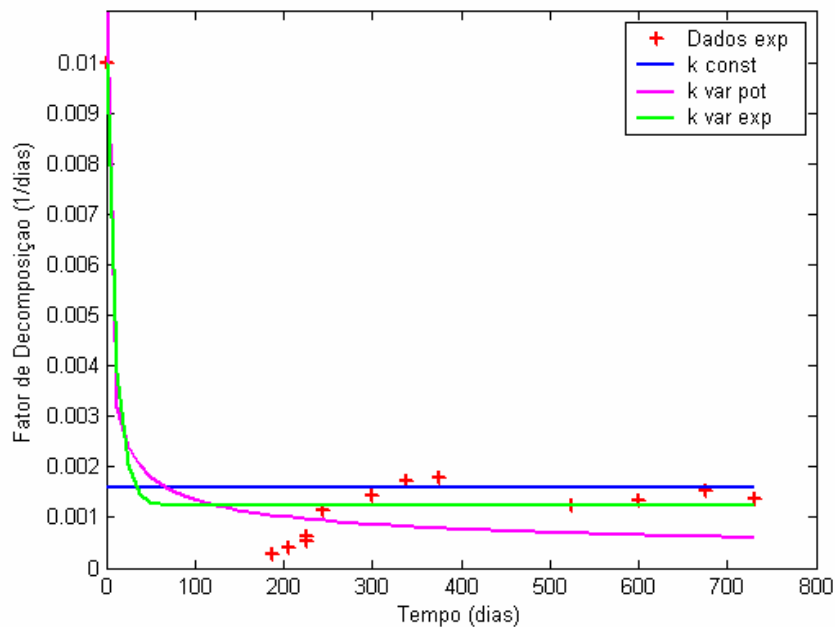


Figura 6.3 - Ajustes de curvas dos modelos propostos para o fator de decomposição considerando os dados experimentais da decomposição da serapilheira da palha de cevada (Paustian *et al.*, 1997).

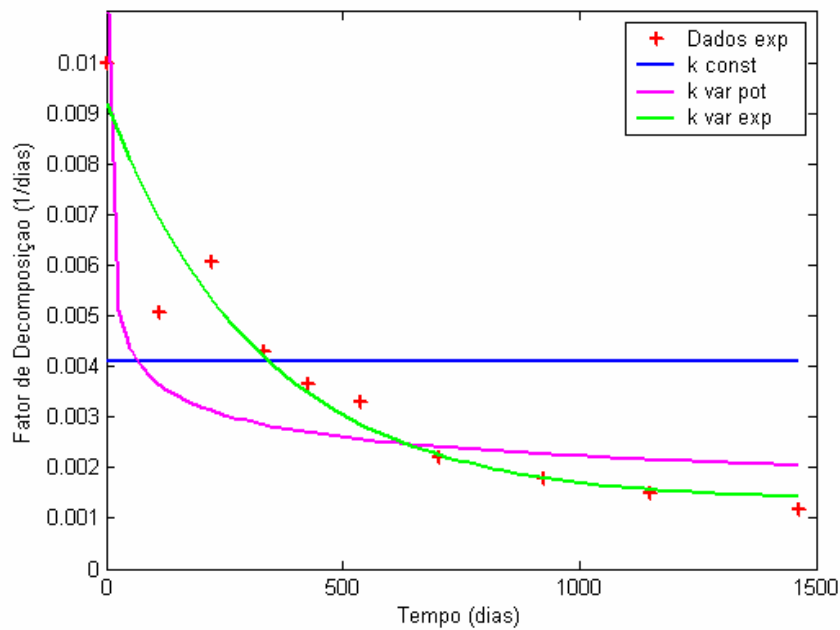


Figura 6.4 - Ajustes de curvas dos modelos propostos para o fator de decomposição considerando os dados experimentais da decomposição da serapilheira da raiz de trevo (Paustian *et al.*, 1997).

Os valores encontrados para os parâmetros e para o coeficiente de determinação para cada equação proposta para o fator de decomposição ( $k$ ) ajustada aos dados experimentais do fator de decomposição da serapilheira de cada espécie, apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, estão expostos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Parâmetros de cada modelo proposto para o fator de decomposição e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para as quatro coleções de dados experimentais do fator de decomposição.

Fator de Decomposição ( $k$ )	Parâmetros	Aroeira Periquita	Palha de Cevada	Raiz de trevo	Acícula de Pinheiro Escocês
$k_c$	$k$	0,0039	0,0016	0,0041	0,001
	$R^2$	0	0	0	0
$k_{vp}$	$a$	0,5	0,5	0,5	0,5
	$p$	0,0105	0,009	0,0105	0,008
	$q$	0,2248	0,4114	0,2248	0,3412
	$R^2$	0,5988	0,8689	0,6740	0,9993
$k_{ve}$	$k_0$	0,0107	0,01	0,0092	0,0099
	$k_\infty$	0,0024	0,0012	0,0013	0,0007
	$b$	0,0161	0,0966	0,003	0,0083
	$R^2$	0,9184	0,9498	0,9219	0,9994

Observa-se nas Figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4 que o fator de decomposição ( $k$ ) nos primeiros intervalos de tempos apresentou valores mais altos e com o passar dos tempos esses valores diminuem tendendo a uma estabilização na taxa de decomposição ou a variação entre uma taxa e outra torna-se muito pequena. As curvas de ajustes  $k_{ve}$  e  $k_{vp}$  para o fator de decomposição apresentaram uma boa tendência aos dados experimentais, o modelo  $k$  constante ( $k_c$ ) apresentou um coeficiente de determinação zero ( $R^2 = 0$ ), pois  $SQE = SQT$ , assim,

$$R^2 = 1 - \frac{SQE}{SQT} = 0$$

O modelo variável exponencial ( $k_{ve}$ ) mostrou-se melhor em comparação com os outros dois modelos, devido ao fato de ter apresentado melhor coerência física com o problema, obteve uma decomposição mais rápida na fase inicial e depois tendeu a uma estabilização em torno de um valor constante ( $k_\infty$ ) para valores finais do intervalo de tempo estudado. Se o parâmetro  $k_0$  não fosse fixado o decaimento inicial seria amenizado com a compensação dos desvios ao longo do tempo e o parâmetro  $k_\infty$  garante que para tempos maiores o comportamento da função exponencial não tenda para zero e sim para esse valor.



O modelo variável potência ( $k_{vp}$ ) apresentou uma boa tendência aos dados experimentais do fator de decomposição, porém observa-se claramente na Figura 6.3 que para tempos maiores a curva de ajuste tende à zero, o que fisicamente não ocorre, pois a taxa de decomposição tende a um  $k_{\infty}$ .

Nas Figuras 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8 são apresentados os dados experimentais da decomposição de serapilheira da aroeira periquita (*Schinus molle* L.) (Cherobini *et al.*, 2005), da acícula de pinheiro escocês (*Pinus sylvestris* L.), da palha de cevada e da raiz de trevo (Paustian *et al.*, 1997), juntamente com os modelos de ajustes de curvas descritos pelas equações (4.3), (4.4) e (4.5), conforme foi detalhado no Capítulo 4. Os ajustes de curvas foram obtidos através de programas computacionais próprios, com os quais foram determinados os parâmetros e o coeficiente de determinação das equações (4.3), (4.4), (4.5) para os dados experimentais da decomposição de serapilheira de cada espécie estudada, expostos na Tabela 6.2.

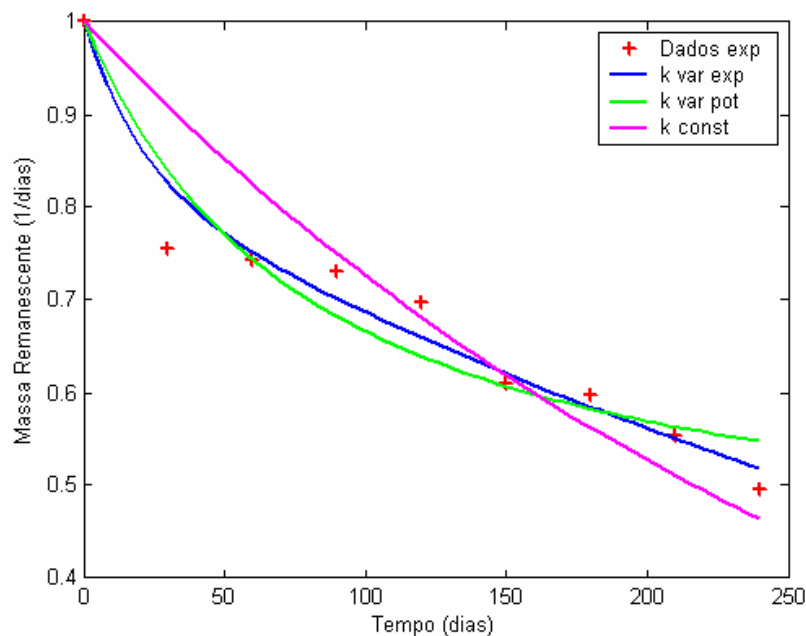


Figura 6.5 - Ajustes de curvas dos modelos matemáticos para a decomposição de serapilheira considerando os dados experimentais da serapilheira da aroeira periquita (Cherobini *et al.*, 2005).

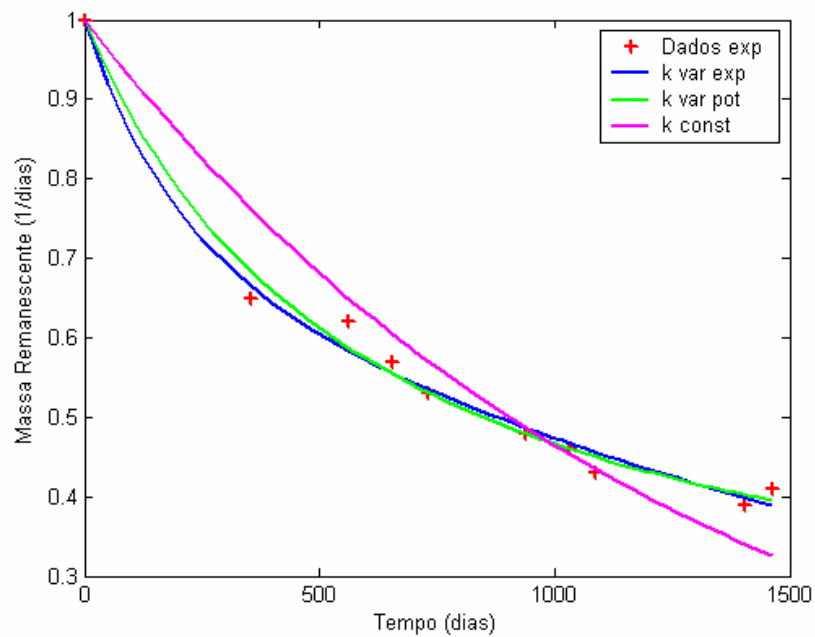


Figura 6.6 - Ajustes de curvas dos modelos matemáticos para a decomposição de serapilheira considerando os dados experimentais da serapilheira da acícula de pinheiro escocês (Paustian *et al.*, 1997).

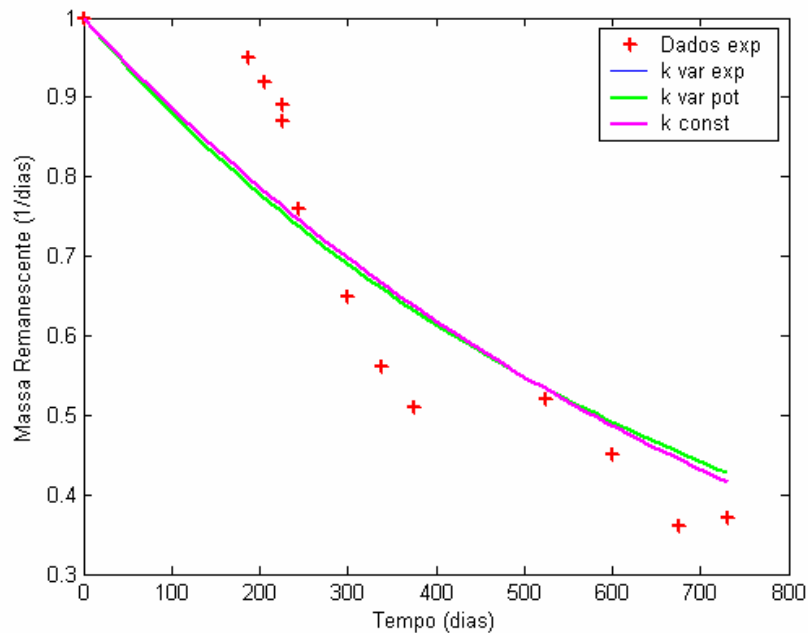


Figura 6.7 - Ajustes de curvas dos modelos matemáticos para a decomposição de serapilheira considerando os dados experimentais da serapilheira da palha de cevada (Paustian *et al.*, 1997).

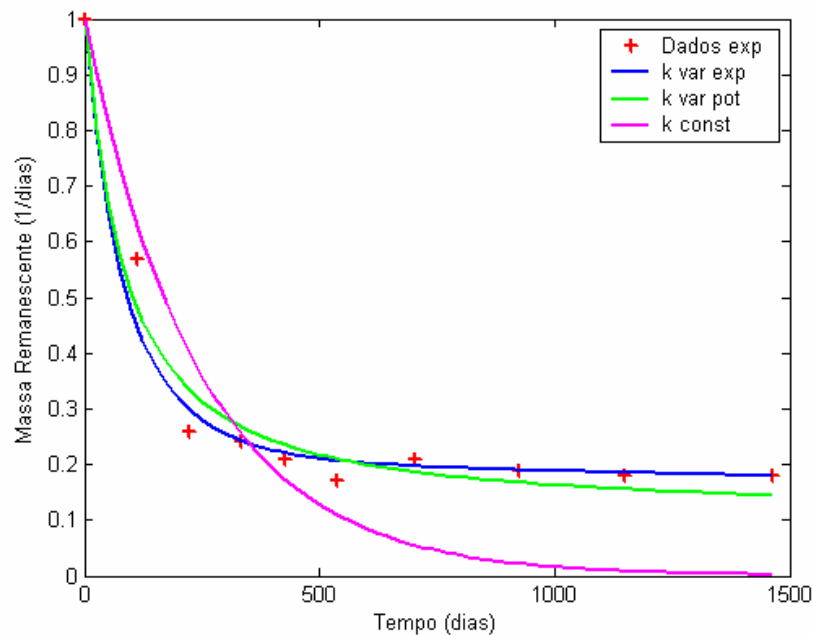


Figura 6.8 - Ajustes de curvas dos modelos matemáticos para a decomposição de serapilheira considerando os dados experimentais da serapilheira da raiz de trevo (Paustian *et al.*, 1997).

Tabela 6.2 – Parâmetros de cada modelo proposto para a decomposição da serapilheira e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para as quatro coleções dos dados experimentais da decomposição da serapilheira.

Nº do Modelo	Modelo	Parâmetros	Aroeira Periquita	Palha de Cevada	Raiz de trevo	Acícula de Pinheiro Escocês
1	$k$ const	$k$	0,0032	0,0012	0,0041	$7,67 \times 10^{-4}$
		$R^2$	0,8015	0,8129	0,7775	0,9101
2	$k$ var pot Janssen e Middleburg	$a$	135	4925	205	862,5
		$p$	205	565	218,66	50
		$q$	1,09	0,5275	0,88	0,55
		$R^2$	0,9116	0,796	0,9698	0,9888
3	$k$ var exp Borges & Coelho	$b$	0,0451	990,5	0,0063	0,0042
		$k_{\infty}$	0,002	0,0012	$9,934 \times 10^{-5}$	$4,16 \times 10^{-4}$
		$R^2$	0,9546	0,8129	0,9717	0,9893

Os dados experimentais em geral não são completos, decorrentes dos métodos de coleta cuja discussão está além dos objetivos deste trabalho, porém, certamente trazem consigo informações do experimento que não foram contempladas na proposição dos modelos

(ação de microorganismos, influência da temperatura e umidade, composição química da serapilheira,...). O que está sendo comparado nesta pesquisa é o desempenho de modelos na descrição de dados, supondo que estes descrevam corretamente a decomposição da serapilheira.

As Figuras 6.5, 6.6, 6.7, 6.8 e a Tabela 6.2 mostram que os três modelos propostos descrevem os dados experimentais usados com coerência. Ou seja, todas as funções apresentam decomposição de serapilheira e os valores do coeficiente de determinação, apesar de diferentes são bem próximos para cada modelo, na mesma coleção de dados.

O modelo de decomposição de serapilheira com  $k$  constante apresentou os menores coeficientes de determinação, mostrando ter dificuldade para descrever variações bruscas de massa, como no caso dos dados para a raiz de trevo e acícula de pinheiro. O modelo de decomposição de serapilheira com  $k$  variável exponencial é o que apresentou melhor coeficiente de determinação em todas as coleções de dados experimentais. Os demais modelos, no máximo apresentaram igual desempenho em algumas das coleções de dados. As diferenças entre os modelos de decaimento com  $k$  potência e com  $k$  exponencial são significativas: as funções usadas para o fator de decomposição diferem com relação à natureza da função (hipérbole e exponencial, respectivamente) e na consideração de um valor assintótico diferente de zero para o fator de decomposição ( $k$  exponencial).

O modelo de decomposição de serapilheira com  $k$  constante apresentou uma tendência de decomposição total da massa mais forte que os demais modelos, como pode ser visualizada para as decomposições de aroeira periquita, raiz de trevo e acícula de pinheiro, principalmente. Isto deve-se a própria natureza da função exponencial que tem como assíntota o eixo  $X(t) = 0$  (onde  $X$  é a massa remanescente).

Todos os modelos apresentaram baixo coeficiente de determinação para a palha de cevada. Esta coleção de dados apresenta fase com forte decaimento de massa e fases com estabilização. Como os modelos são de funções monótonas, ou seja, não consideram a atuação de fatores específicos em determinados intervalos de tempo, tais como as variações de temperatura e umidade ou a predominância da decomposição de certos tipos de matéria orgânica.

## 6.2. Simulações dos modelos matemáticos propostos para a decomposição da serapilheira em função do tempo e da temperatura ambiente.

Nas Figuras 6.9, 6.11, 6.13 e 6.15 são apresentados os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia com influência do tempo e da temperatura ambiente de Pöhhacker and Zech (1995), com os modelos matemáticos de ajustes propostos. Para as equações (5.8), (5.11), (5.18) foram realizados ajustes não lineares obtidos através de um programa computacional próprio usando do Método de Newton, com o qual foram determinados os parâmetros de ajuste e para a equação (5.9) foi desenvolvido um ajuste linear através do Método dos Mínimos Quadrados. Nos ajustes foi considerado o fator de decomposição ( $k$ ) constante.

Nas Figuras 6.10, 6.12, 6.14 e 6.16 são apresentados somente os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função da temperatura ambiente para cada intervalo de tempo com os ajustes propostos pelas equações (5.8), (5.9), (5.11) e (5.18).

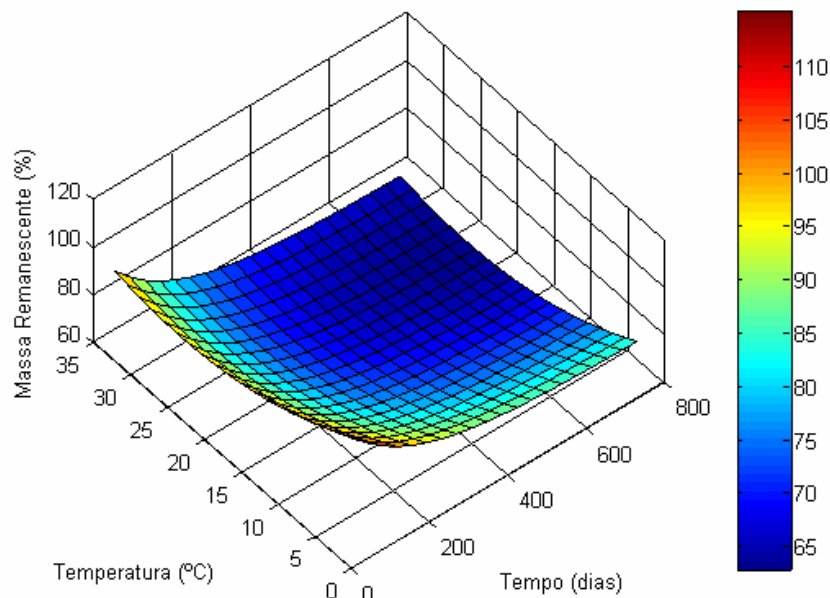


Figura 6.9 - Ajuste com o modelo exponencial parabólico linear para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função do tempo e da temperatura ambiente (Pöhhacker and zech, 1995).

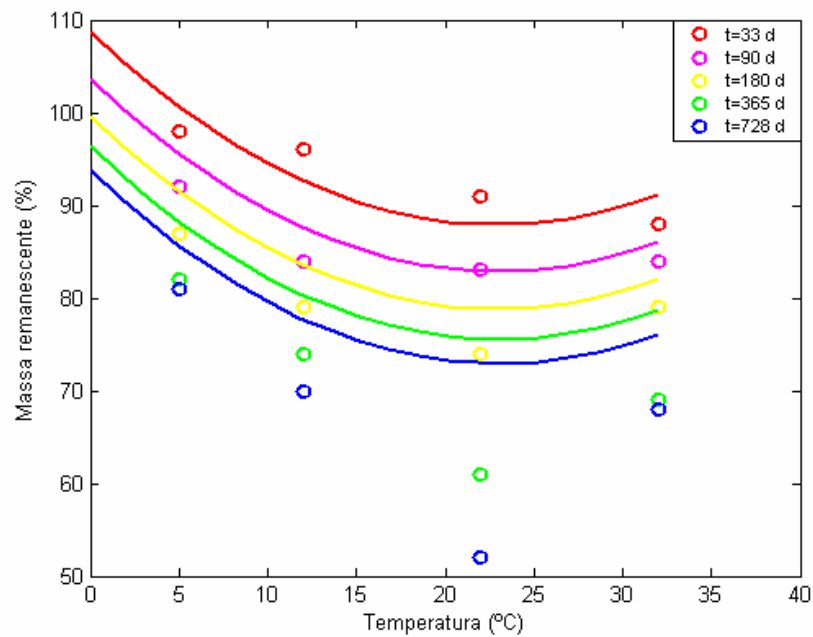


Figura 6.10 - Ajuste com o modelo exponencial parabólico linear para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função da temperatura ambiente (Pöhhacker and Zech, 1995).

O modelo exponencial parabólico linear (Figura 6.9) apresentou um bom ajuste aos dados experimentais da decomposição de serapilheira em função do tempo e da temperatura ambiente, e um coeficiente de determinação significativo, exposto na Tabela 6.3, porém para  $t = 0$  não satisfaz a condição inicial dos dados.

Observando a Figura 6.10, tem-se que as curvas de ajustes com o modelo exponencial parabólico linear para a decomposição de serapilheira em função da temperatura ambiente apresentam uma boa tendência aos dados experimentais para os três primeiros intervalos de tempos, enquanto que para um período de tempo maior as curvas não acompanharam a tendência parabólica dos dados.

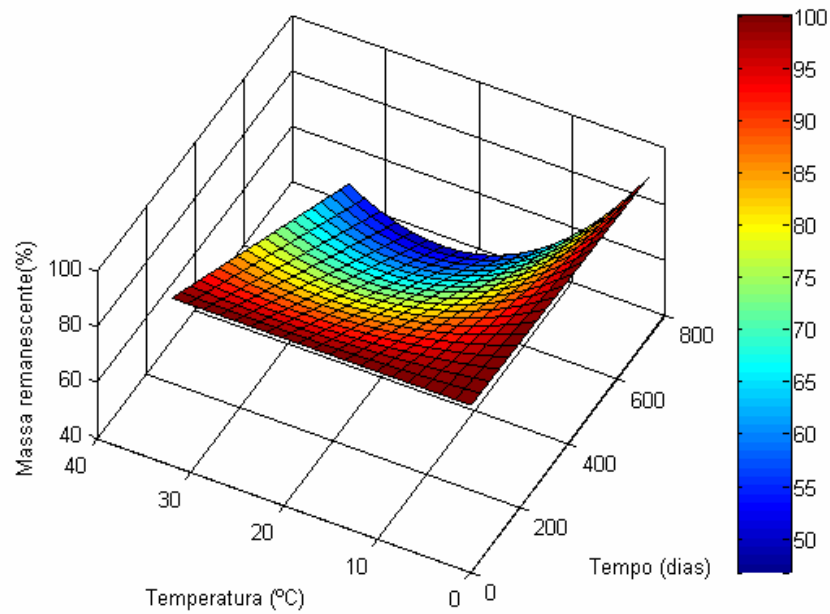


Figura 6.11 - Ajuste com o modelo exponencial parabólico não linear para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função do tempo e da temperatura ambiente (Pöhhacker and zeck, 1995).

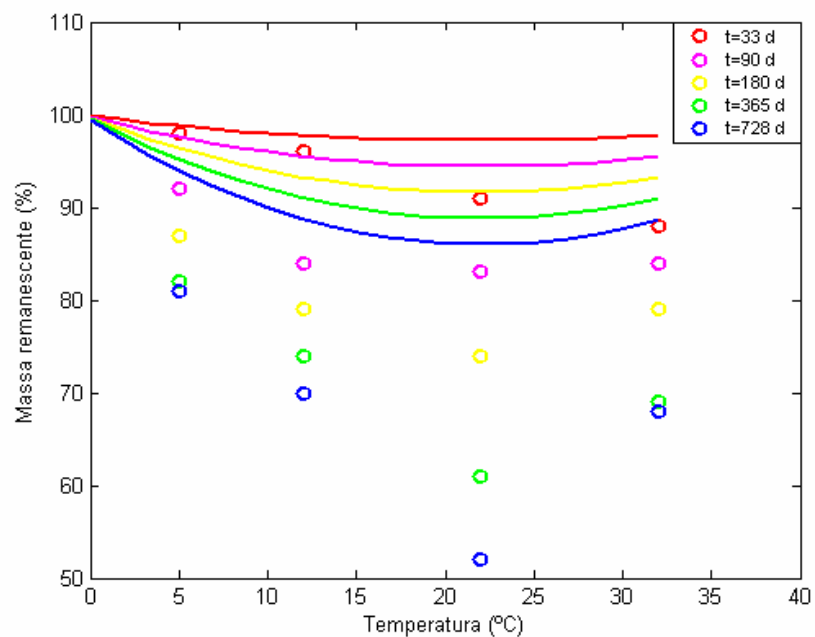


Figura 6.12 - Ajuste com o modelo exponencial parabólico não linear para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função da temperatura ambiente (Pöhhacker and Zech, 1995).

O modelo exponencial parabólico não linear (Figura 6.11) apresentou um bom ajuste para a fase inicial da decomposição, coerente aos dados experimentais. O ajuste apresentou um comportamento parabólico da decomposição da serapilheira em função da temperatura, e em função do tempo apresentou um comportamento exponencial correspondendo à tendência dos dados.

Além disso, seria esperada uma decomposição quando  $T = 0$ , ainda que reduzida o que não é previsto pelo modelo.

A Figura 6.12 mostra que as curvas de ajustes com o modelo exponencial parabólico não linear para a decomposição de serapilheira em função da temperatura apresentam parábolas com concavidade mais aberta que a tendência parabólica dos dados experimentais. Observa-se que o modelo não apresenta um bom ajuste para os dados amostrados.

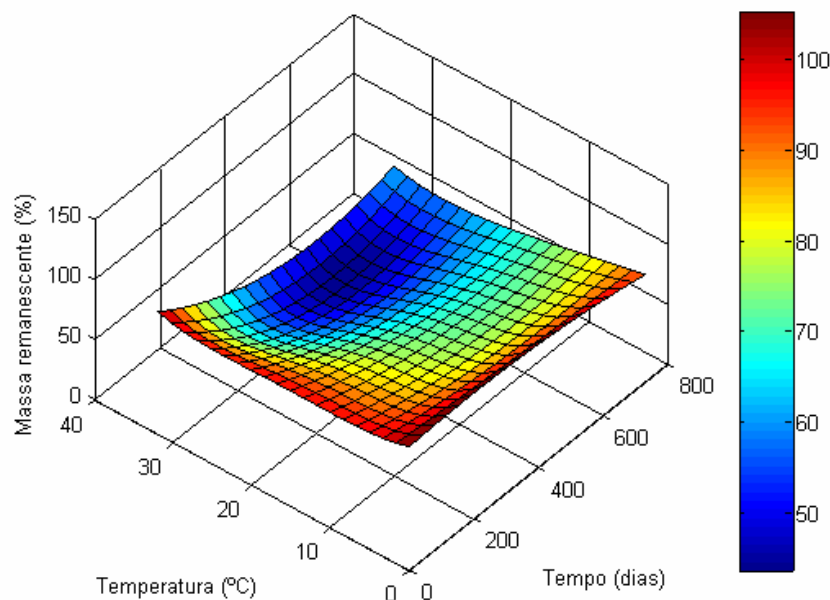


Figura 6.13 - Ajuste com o modelo parabólico para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função do tempo e da temperatura ambiente (Pöhhacker and zeck, 1995).



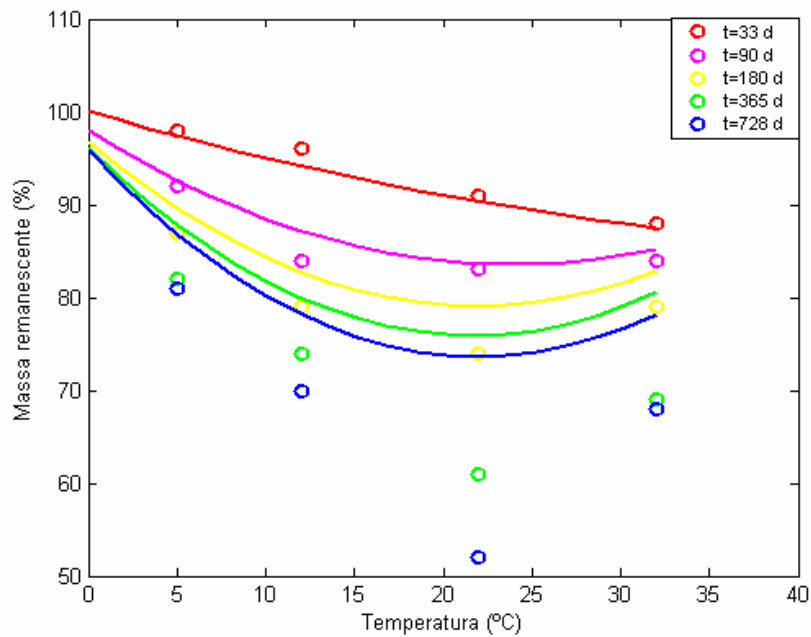


Figura 6.14 - Ajuste com o modelo parabólico para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função da temperatura ambiente (Pöhhacker and Zech, 1995).

O modelo parabólico (Figura 6.13) apresentou um comportamento coerente aos dados experimentais, porém mostrou algumas irregularidades características do modelo polinomial, que pode ser observada para a  $t = 0$  onde se observa uma leve curva com valores acima da condição inicial.

A Figura 6.14 mostra que as curvas de ajustes com o modelo parabólico para a decomposição de serapilheira em função da temperatura estão coerentes com os dois primeiros intervalos de tempo. A partir do tempo de  $t = 180$  dias as curvas passam a não acompanhar o comportamento apresentado pelos dados experimentais.

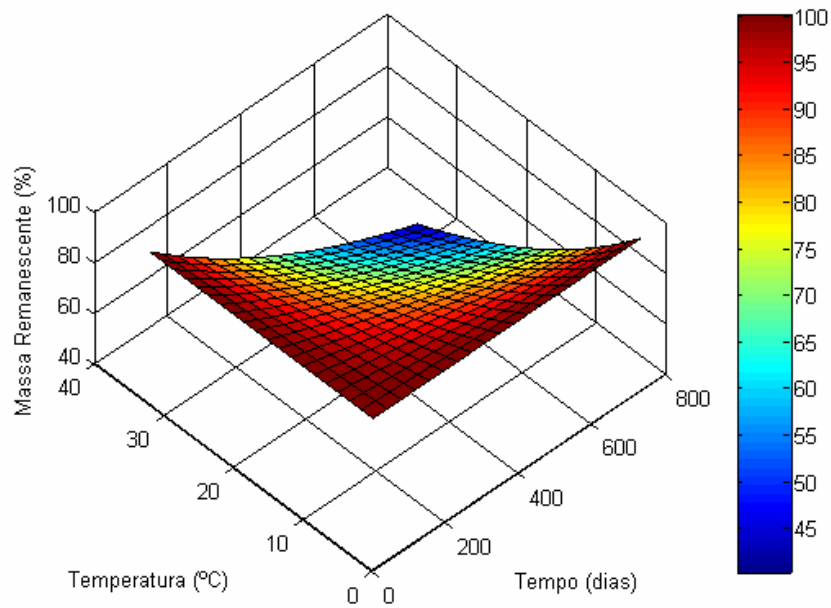


Figura 6.15 - Ajuste com o modelo multiplicativo para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função do tempo e da temperatura ambiente (Pöhhacker and Zeck, 1995).

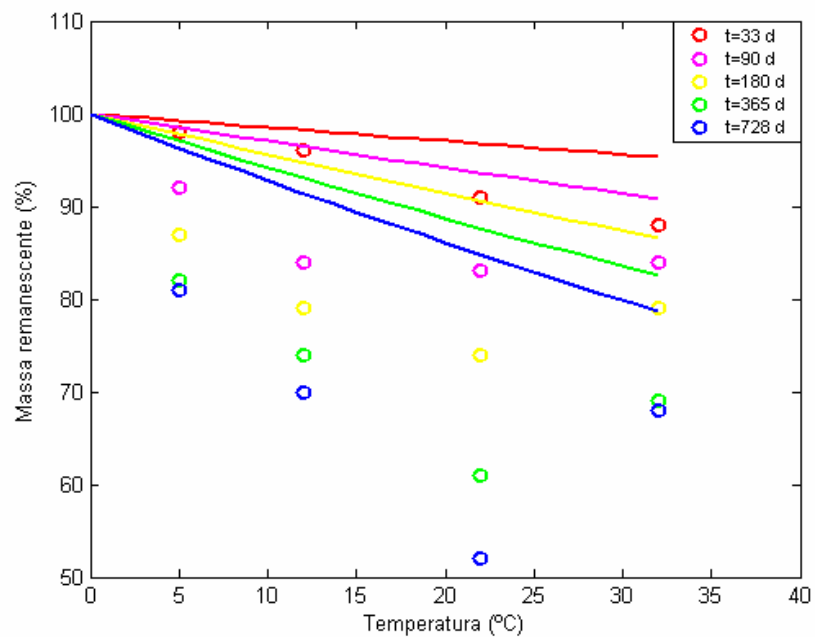


Figura 6.16 - Ajuste com o modelo multiplicativo para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função da temperatura ambiente (Pöhhacker and Zech, 1995).

O modelo multiplicativo (Figura 6.15) apresentou um comportamento exponencial para a decomposição da serapilheira de faia em função do tempo e da temperatura ambiente, mostrando uma boa tendência aos dados em função do tempo. Entretanto, a decomposição aumenta com o aumento da temperatura, mesmo para temperaturas altas acima de  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o que não apresenta coerência com os dados experimentais (Figura 6.16).

Os valores encontrados para o coeficiente de determinação de cada modelo proposto para a decomposição da serapilheira de faia em função do tempo e da temperatura ambiente ajustada aos dados experimentais (Pöhhacker and Zeck, 1995) apresentados na Tabela 5.1, estão expostos na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) dos modelos matemáticos propostos para os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia em função do tempo e da temperatura ambiente (Pöhhacker and Zeck, 1995).

Modelos	$R^2$
Modelo exponencial parabólico linear	0,9123
Modelo exponencial parabólico não linear	0,0371
Modelo parabólico	0,3426
Modelo multiplicativo	0,4920

## 7. Conclusões

A serapilheira é formada por componentes com diferentes características biológicas e físicas. O seu processo de decomposição varia ao longo do tempo apresentando uma fase mais rápida de decomposição no início, seguida por uma fase mais lenta para tempos maiores.

Os modelos para a decomposição de serapilheira em função do tempo, com os fatores de decomposição propostos, apresentaram coerência com os dados experimentais. O modelo para a decomposição de serapilheira com  $k$  constante apresentou os menores coeficientes de determinação para as coleções de dados experimentais usadas, enquanto que o modelo com  $k$  variável de forma exponencial obteve os maiores coeficientes. No modelo com  $k$  variável exponencial, a consideração de um valor assintótico diferente de zero melhor satisfaz a realidade física do processo de decomposição, que considera existir decomposição para tempos maiores, porém a taxas bem pequenas.

Além disso, o modelo com  $k$  variável segundo funções exponenciais tende a prever uma quantidade de massa remanescente maior em relação ao modelo com  $k$  constante, porém menor em relação ao modelo com  $k$  variável de acordo com uma função potência. Isto por que a diminuição do valor de  $k$  de acordo com uma função potência pressupõe que este valor de  $k$  irá se reduzir até um tempo infinito. Ao contrário, o modelo exponencial aqui utilizado pressupõe que existe um valor assintótico de  $k$ , ou seja, existe uma fração final de serapilheira que possui, em tese, um valor fixo de decomposição.

Os modelos com  $k$  variável são superiores quando se buscam previsões em prazos mais longos ou em ecossistemas e condições climáticas onde a decomposição é mais rápida.

Dentre os modelos matemáticos propostos para a decomposição de serapilheira em função do tempo e da temperatura, o modelo exponencial parabólico linear apresentou maior coerência com os dados experimentais da literatura, e melhor coerência com o sentido físico e biológico do processo de decomposição. Porém, na fase inicial da decomposição, em relação à temperatura, apresentou um decaimento de massa mais elevado que a tendência apresentada pelos dados. Os modelos apresentaram dificuldades em contemplar a amplitude de variação dos dados quando a temperatura se aproxima de  $22^{\circ}C$  como pode ser observado na Figura 6.16.

Segundo os dados experimentais da decomposição da serapilheira de faia, a decomposição de serapilheira em função da temperatura tem um comportamento parabólico, mostrando que há uma temperatura na qual a decomposição é maior. Esta temperatura está compreendida entre  $20^{\circ}$  e  $25^{\circ}\text{C}$ . Dos modelos de ajustes propostos, somente o modelo multiplicativo não apresentou essa tendência.

Como recomendações finais, propõem-se que os modelos com  $k$  variável sejam utilizados no lugar de modelos com  $k$  constante, especialmente quando se pretende prever a manutenção de estoques de matéria orgânica (e carbono) em prazos longos.

Entretanto, mais pesquisas são necessárias para validar os diferentes modelos. Além disso, necessita-se um desenvolvimento maior nos modelos que buscam descrever a interferência da temperatura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABER, J. D. & MELILLO, J. M. Litter decomposition; is measuring relative contributions of organic matter and nitrogen to forest soils. *Canadian Journal of Botany*, v. 58, p 416-421, 1980.

ABER, J. D & MELILLO, J. M. Nitrogen immobilization in decaying hard-wood leaf litter as a function of initial nitrogen and lignin content. *Canadian Journal of Botany*, v. 60, p. 2263-2269, 1982.

ÄGREN, G. I. and BOSSATA, E. Theoretical analysis of microbial biomass dynamics in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 26, n. 1, p. 143-148, 1994.

ANDERSON, J. M. & SWIFT, M. J. Decomposition in tropical forests. In: SUTON, S. L.; WHITMORE, T. C. and CHADWICK, A. C., eds. *Tropical rain forest ecology and management*. Oxford, Blackwell, 1983.

ANDRADE, A. G. Ciclagem de nutrientes e arquitetura radicular de leguminosas arbóreas de interesse para revegetação de solos degradados e estabilização de encostas. 1997. 282 p. Tese de Doutorado, UFRRJ, Instituto de Agronomia Seropédica, 1997.

ACIESP. Glossário de Ecologia. 2. Ed. São Paulo: *ACIESP* – Academia de Ciência do Estado de São Paulo, 352 p. 1997.

AUSTIN, A. M. & VITOUSEK, P. M. Precipitation, decomposition and litter decomposability of *Metrosideros polymorpha* in native forests on Hawaii. *Journal of Ecology*, v. 88, p. 129-138, 2000.

BERG, B. & STAAF, H. Decomposition rate and chemical changes of Scots pine needle litter. II influence of chemical composition. In Structure and function of northern coniferous forests – An ecosystem study (ed. T. Persson). *Ecological Bulletins (Stockholm)*, v. 32, p. 363-390, 1980.

BERG, B.; HANNUS, K.; POPOFF, T. and THEANDER, O. Changes in organic-chemical components during decomposition. Long-term decomposition in a Scots pine forest I. *Canadian Journal of Botany*, v. 60, p. 1310-1319, 1982.

BERG, B. and EKBOHM, G. Litter mass-loss rates and decomposition patterns in some needle and leaf litter types. Long-term decomposition in Scots pine forest VII. *Canadian Journal of Botany*, v. 69, p. 1449-1456, 1991.

BERG, B. et al. Some foliar litter types have a maximum limit for decomposition a synthesis of data from forest systems. *Canadian Journal of Botany*, v. 74, p. 659–672, 1996.

BERG, B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *For. Ecol. Manage.* v. 133, p. 13-22, 2000.

BERG, B. & MEENTEMEYER, V. Litter fall in some European coniferous forests as dependent on climate: a synthesis. *Canadian Journal of Forestry Research*, v. 31, p. 292-301, 2001.

BERG, B.; DE SANTO, A. V.; RUTIGLIANO, F. A.; FIERRO, A. and EKBOHM, G. Limit values for plant litter decomposing in two contrasting soils – influence of litter elemental composition. *Acta Oecologica*, v. 24, p. 295-302, 2003.

BRAY, J. R. and GORHAM, E. Litter production in forests of the world. *Advances in Ecological Research*, v.2, p. 101-157, 1964.

BURGHOUTS, T. B. A.; CAMPBELL, E. J. F. and KOLDERMAN, P. J. Effects of tree species heterogeneity on leaf fall in primary and logged dipterocarp forest in the Ulu Segama Forest Reserve, Sabah, Malaysia. *Journal of Tropical Ecology*, v. 10, p. 1-26, 1994.

CÁRCAMO, H. A.; PRESCOTT, C. E.; CHANWAY, C. P. and ABE, T. A. Do soil fauna increase rates of litter breakdown and nitrogen release in forests of British Columbia, Canada? *Canadian Journal of Forest Research*, v. 31, p. 1195-1204, 2001.

CHEROBINI, A.; BORGES, P. A. P. e COELHO, G. C. Modelagem matemática da decomposição e acúmulo da serapilheira em um cultivo florestal. *XXVIII CNMAC (2005)* - Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional. Centro Universitário do Senac, Campus de Santo Amaro. São Paulo.

CLARK, M., and GILMOUR, J. The effect of temperature on decomposition at optimum and saturated soil water contents. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 47, p. 927-929, 1983.

COELHO, G. C. (Org.). Biodiversidade e cultura: a gestão ambiental em foco. Editora da UNIJUÍ: Ijuí, 2003, p.127-133.

COELHO, G. C. & BORGES, P. A. P. Mathematical modelling of the litter decomposition and accumulation in a forest plantation – a transient case. Proceedings of the 2005 International Symposium on Mathematical and Computational Biology – *BIOMAT 2005*, Petrópolis-RJ, Brazil, E-papers Serviços Editoriais: Rio de Janeiro, Brazil, p. 263-279.

CORREIA, M. E. F. & ANDRADE, A. G. Formação de serapilheira e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A. & CAMARGO, F. A. O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Gênese, p.197-225. 1999.

COÛTEAUX, M. M.; MCTIERNAN, K. B.; BERG, B.; SZUBERLA, D.; DARDENNE, P. and POTTNER, P. Chemical composition and carbon mineralization potential of scots pine needles at different stages of decomposition. In: *Soil Biology Biochemistry*. v. 30, nº 5. Elsevier Science Ltda. p. 583-595, 1998.

COÛTEAUX, M. M.; ALOUI, A.; KURZ-BESSON, C. *Pinus halepensis* litter decomposition in laboratory microcosms as influenced by temperature and a millipede, *Glomeris marginata*. *Applied Soil Ecology*, v. 20, p. 85-96, 2002.

DALIAS, P.; ANDERSON, J. M.; BOTTNER, P.; COÛTEAUX, M. M. Long-term effects of temperature on carbon mineralisation processes. *Soil Biol. Biochem.*, v. 54, p. 147-170, 2001.

DARNELL, R. M. in *Estuaries, AAAS Publ.*, v. 83, p. 376-82. 1967 (decomposição em estuários).



DIAS, H. C. T. & OLIVEIRA FILHO, A. T. Variação temporal e espacial da produção de serapilheira em uma área de Floresta Estacional Semidecídua Montana em Lavras-MG. *Revista Árvore*, v. 21, n. 1, p. 11-26, 1997.

DYER, M. L. A model of organic decomposition rates based on climate and litter properties. M.A. Thesis, University of Georgia, Athens, G.A. 1986.

FOGEL, R. & CROMACK, K. Effects of habitat and substrate quality on Douglas fir litter decomposition in western Oregon. *Canadian Journal of Botany*, v. 55, p. 1632-1640, 1977.

GOLLEY, F. B.; MCGINNIS, J. T.; CLEMENTS, R. G.; CHILD, G. I.; DUEVER, M. J. *Ciclagem de Minerais em um Ecossistema de Floresta Tropical Úmida*. São Paulo: EDUSP, 1978.

HAAG, H. P. Ciclagem de nutrientes em florestas tropicais. Campinas, SP, Brasil. *Fundação Cargil*, 1985, 114p.

HAMMEL, K. E. Fungal degradation of lignin. In: G. Cadish & K. E. Giller, *Driven by nature: plant litter quality and decomposition*. CAB International: Cambridge, 1997, p. 33-45.

HEAL, W.; ANDERSON, J. M. & SWIFT, M. J. Plant litter quality and decomposition: An historical overview. In: CADISCH, G. & GILLER, K.E., eds. *Driven by nature: Plant litter quality and decomposition*. Wallingford, CAB International. p. 3-30, 1997.

HOUGHTON, R. A. As florestas e o ciclo de carbono global: armazenamento e emissões atuais. In: *Emissão x Seqüestro de CO<sub>2</sub>: Uma nova oportunidade de negócios para o Brasil*, 1994. Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, p. 39-76, 1994.

HOWARD, P. J. A., and HOWARD, D. M. Microbial decomposition of tree and shrub leaf litter. 1. Weight loss and chemical composition of decomposing litter. *Oikos*, v. 25, p. 311-352. 1974.

IPCC. Land use, land use change, and forestry. In: WATSON, R. T.; NOBLE, I. R.; BOLIN, B.; RAVINDRANATH, N. H.; VERRARDO, D. J.; DOKKEN, D. J. (eds). A special report of the IPCC. Published for IPCC by the world meteorological society and UNEP. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2000.

JANSSEN, B. H. A simple method for calculating decomposition and accumulation of 'young' organic matter. *Plant and Soil*, v. 76, p. 297-304, 1984.

KIRSCHBAUM, M. U. F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic storage. *Soil Biol. Biochem.*, v. 27, p. 753-760, 1994.

LACHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária Ltda, 2000. 320p.

LAVELLE, P.; BLANCHART, E.; MARTIN, A. & MARTIN, S. A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems: applications to soils of humid tropics. *Biotropica*, v. 25, p. 130-150, 1993.

LEITHOLD, L. *O cálculo com Geometria Analítica*. V.2. São Paulo. Editora Harbra Ltda. 1994. 1174p.

MARTINS, S. V. & RODRIGUES, R. R. Produção de serapilheira em clareiras de uma floresta estacional semidecidual no município de Campinas, SP. *Revista Brasileira de Botânica*, v. 22, n.3, p. 405-412, 1999.

MASON, C. F. *Decomposição*. São Paulo: EDU-EDUSP, 63 p. (Temas de Biologia, v. 18). 1980.

MCCLAUGHERTY, C. A.; PASTOR, J.; ABER, J. D. and MELILLO, J. M. Forest litter decomposition in relation to soil nitrogen dynamics and litter quality. *Ecology*, v.66, p. 266-275, 1985.

MELILLO, J. M.; ABER, J. D. and MURATORE, J. F. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*, v. 63, p.621-626, 1982.

MELIN, E. Biological decomposition of some types of litter from North American forests. *Ecology*, v.11, p. 72-101, 1928.

MIDDELBURG, J. J. A simple rate model for organic matter decomposition in marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 53, p. 1577-1581, 1989.

MONTGOMERY, D.; RUNGER, G. Estatística Aplicada e probabilidade para Engenheiros. 2ª ed, p.221. LTC, 2003.

MOORE, A. Temperature and moisture dependence of decomposition rates of hardwood and coniferous leaf litter. *Soil Biol. Biochem.*, v.18, p. 427-435, 1986.

MORAES, R. M.; DELITTI, W. B. C.; RINALDI, M. C. S.; REBELO, C. F. Ciclagem mineral em Mata Atlântica de encosta e mata sobre restinga, Ilha do Cardoso, SP: nutrientes na serapilheira acumulada. In: SIMPÓSIO DE ECOSSISTEMAS BRASILEIROS, 4, 1998, Águas de Lindóia. Anais Águas de Lindóia: ACIESP, p.71-77, 1998.

O'CONNELL, A. M. Microbial decomposition (respiration) of litter in eucalypt forests of south-western Australia: an empirical model based on laboratory incubations. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 22, p. 153-160. 1989.

ODUM, E. P. The strategy of ecosystems development. *Science*, v. 164, p. 262-270, 1969.

ODUM, E. P. Ecologia. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A.,1988. 434 p.

OLDEMAN, L. R. and LYNDEN, G. W. J. Revisiting the GLASOD methodology. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C. & STEWARTT, B. A., eds. Methods of assessment of soil degradation. New York, CRC Press, 1998. p. 423-440.

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

PARROTTA, J. A.; TURNBULL, J. W. and JONES, N. Catalyzing native forest regeneration on degraded tropical lands. *For. Ecol. Manage.* v. 99, p.1-7, 1997.

PAUSTIAN, K.; ÄGREN, G. I. and BOSATTA, E. Modelling litter quality effects on decomposition and soil organic matter dynamics. *Natural Resources Ecology Laboratory, Swedish University of Agricultural Sciences*, v. 24, p. 313-335, 1997.

POGGIANI, F. Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de plantações florestais de Eucalyptus e Pinus. Implicações silviculturais. Piracicaba: ESALQ. 211 p., 1985. (Tese de Livre-Docente)

POGGIANI, F.; STAPE, J. L.; GONÇALVES, J. L. M. Indicadores de sustentabilidade das plantações florestais. *Série Técnica IPEF*, v. 12, nº 31, p. 33-44, 1998.

POGGIANI, F.; SCHUMACHER, M. V. Ciclagem de nutrientes em florestas nativas. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Eds.) *Nutrição e Fertilização Florestal*. Piracicaba: IPEF, 2000, Cap. 10, p. 287-308.

PORTES, M. C. G. O.; KOEHLER, A.; GALVÃO, F. Variação sazonal de deposição de serapilheira em uma Floresta Ombrófila Densa Altomontana no morro do Anhangava – PR. *Floresta*, v. 26, n. ½, p. 3-10, 1996.

PÖHHACKER, R. and ZECH, W. Influence of temperature on CO<sub>2</sub> evolution, microbial biomass C and metabolic quotient during the decomposition of two humic forest horizons. *Biol. Fertil. Soils*, v. 19, p. 239-245, 1995.

PROCTOR, J. *Tropical forest Litterfall*. I. Problems of data comparison. *Tropical Rain Forest*, p. 267-273, 1983.

REIS, M. G. F. et al. Seqüestro e armazenamento de carbono em florestas nativas e plantadas dos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo. In: *Seminário Emissão x Seqüestro de CO<sub>2</sub>: Uma nova oportunidade de negócios para o Brasil*, 1994. Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: CVRD/FBDS, 1994. p. 155-195.

RUGGIERO, M. A. G. e LOPES, V. L. R. Cálculo Numérico: aspectos teóricos e computacionais. 2º ed. São Paulo: Makron Books, 406 p.1996.

SANQUETA, C.R. et al. As florestas e o carbono. In: REZENDE, A. V. (Eds.) O estoque de carbono na cerrado: um estudo de caso. Curitiba: UFPR, 2002, Cap. 9, p. 175-190.

SMITH, P. et al. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long term experiments. *Geoderma* (in press). 1996.

SOMA, K. & SAITO, T. Ecological studies of soil organisms with references to the decomposition of pine needles. II. Litter feeding and breakdown by the woodlouse, *Porcellio scaber*, *Plant Soil*, v. 75, p. 139-151, 1983.

SWIFT, M. J.; HEAL, O. W. & ANDERSON, J. M. Decomposition in terrestrial ecosystems. Berkley, University of California Press, 1979.

TATA ENERGY RESEARCH INSTITUTE E WOODS HOLE RESEARCH CENTRE. Conference Statement. International Conference on Global Warning and Climate Change. Perspectives from Developing Countries. Nova Déli, 21-23 de fevereiro de 1988.

TAYLOR, B. R.; PARKINSON, D. & PARSONS, W. F. J. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: a microcosm test. *Ecology*, v. 70, p. 97-104, 1989.

TENNEY, F. G. & WAKSMAN, S. A. Composition of natural organic materials and their decomposition in the soil: IV The nature and rapidity of decomposition of the various organic complexes in different plant materials, under aerobic conditions. *Soil Science*, v. 28, p.55-84, 1929.

TOTTEN, M. Getting it right – emerging markets for storing carbon in forests. Washington, DC: Forest Trends/World Resources Institute. 2000.

TROFYMOW, J. A. et al. Rates of litter decomposition over 6 years in Canadian forests: influence of litter quality and climate. *Canadian Journal of Forestry Research*, v. 32, p.789-804, 2002.

UPADHYAY, V. P. and SINGH, J. S. Nitrogen dynamics of decomposing hardwood leaf litter in a Central Himalayan forest. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 17, p.827-830, 1985.

UPADHYAY, V. P.; SINGH, J. S.; MEENTEMEYER, V. Dynamics and weight loss of leaf litter in central himalayan forests abiotic versus litter quality influences. *Journal of Ecology*, v. 77, p. 147-161, 1989.

VIEIRA, S. A. Efeito das plantações florestais (*Eucalyptus* sp.) sobre a dinâmica de nutrientes em região de cerrado do Estado de São Paulo. Dissertação (Mestrado). Piracicaba, 1998. 73p. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo.

VIOLA, E. A participação do Brasil no Protocolo de Kyoto. Carta Internacional. Universidade de São Paulo, São Paulo, ano X, no. 107/108, jan./fev. 2002, p. 16-18.

WALSE, C.; BERG, B.; SERDRUP, H. Review and synthesis of experimental data on organic matter decomposition with respect to the effect of temperature, moisture, and acidity. *Environ. Rev.*, v. 6, p. 25-40, 1998.

WILLIAMS, S. T. and GRAY, T. R. G. Decomposition of litter on the soil surface. In: Dickenson, C.H. and Pugh, G.J.F. *Biology of Plant Litter Decomposition*, v. 2. Academic Press, London, p. 611-622, 1974.

WITKAMP, M. Decomposition of leaf litter in relation to environment, microflora and microbial respiration. *Ecology*, v. 47, p. 194-201, 1966.

WITKAMP, M. and AUSMUS, B. S. Processes in decomposition and nutrient transfer in forest systems. In: Anderson, J.M., Macfadyen, A. (Eds.), *The Role of Terrestrial and Aquatic Organisms in Decomposition Processes*. Blackwell, Oxford, p. 375-396, 1976.

YU, C. M. Seqüestro florestal de carbono no Brasil: dimensões políticas socioeconômicas e ecológicas. São Paulo, SP: Annablume; IEB, 280 p. 2004.