



**FERNANDO DE CASTRO NETO**

**USO DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS PARA  
CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS EM  
POVOAMENTOS DE EUCALIPTO**

**LAVRAS – MG**

**2015**

**FERNANDO DE CASTRO NETO**

**USO DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS PARA CLASSIFICAÇÃO DE  
SÍTIOS EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. José Roberto Soares Scolforo

**LAVRAS - MG**

**2015**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Neto, Fernando de Castro.

Uso de variáveis climáticas para classificação de sítios em povoamentos de eucalipto / Fernando de Castro Neto. – Lavras : UFLA, 2015.

135 p. : il.

Dissertação(mestrado acadêmico)–Universidade Federal de Lavras, 2015.

Orientador: José Roberto Soares Scolforo.

Bibliografia.

1. Precipitação. 2. Crescimento. 3. Manejo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

**FERNANDO DE CASTRO NETO**

**USO DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS PARA CLASSIFICAÇÃO DE  
SÍTIOS EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 07 de agosto de 2015

Dr. José Márcio de Mello	UFLA
Dr. Antônio Carlos Ferraz Filho	UFLA
Dra. Adriana Leandra de Assis	UFMG

Dr. José Roberto Soares Scolforo  
Orientador

**LAVRAS - MG**

**2015**

## AGRADECIMENTOS

Em especial, a minha querida Tâinha que era uma das maiores incentivadoras deste sonho.

Agradeço a Deus, por me dar saúde e paz para viver com dignidade.

Aos meus pais Heleno de Castro e Silene Matos, por serem minha paixão.

Aos meus irmãos Mateus, pela amizade e Bernardo, por alegrar a minha vida.

Agradeço a minha namorada Brenda, por ser o meu conforto em todos os momentos.

Aos meus familiares, por estarem sempre ao meu lado.

Aos meus amigos do LEMAF (Henrique, Marcel, Pedro, Aliny, Iasmim, Matheus, Kalil, Thiza, Moreira, Bruno, Flávio e Bily), pela amizade durante esses anos e por terem contribuído diretamente para a compilação dos dados.

Em especial, ao meu amigo Henrique que foi um dos maiores responsáveis por este trabalho.

Aos meus amigos de república (Mozart, Luiz, Thales e Iberê).

A UFV e UFLA, pela oportunidade de aprendizado.

Ao LEMAF, pela disponibilização dos laboratórios e equipamentos.

Ao professor José Roberto, pela honra de ser o seu orientado.

Aos professores (José Márcio, Bob, Laércio, Carlos) agradeço pela amizade e conhecimentos compartilhados.

À Capes e ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Florestal.

À Fibria, pela disponibilização dos dados desta pesquisa.

Aos amigos da TTG Brasil, pelo companheirismo, em especial ao Nairam pelos incentivos e paciência.

Agradeço a todos vocês!

## RESUMO GERAL

A capacidade produtiva do local na modelagem florestal é representada pelo índice de sítio ou projeção da altura dominante na idade de referência. A classificação de sítio é a chave de todo o sistema de prognose, portanto, métodos relacionados ao aumento da acurácia e flexibilidade das equações são importantes para gerar cenários de produtividade em decorrência de alterações climáticas. Assim, conduziu-se este trabalho, com o objetivo geral de relacionar desenvolvimento florestal com as variáveis climáticas, tendo como objetivo inicial propor um modelo flexível para representar o crescimento em altura dominante. Em seguida, identificar quais e como as variações climáticas afetam a capacidade do local em produzir madeira. A pesquisa foi relacionada ao desenvolvimento de povoamentos de eucaliptos submetidos ao manejo de alto fuste e talhadia, na região centro-norte do Espírito Santo e sul da Bahia. Os dados utilizados neste estudo são provenientes de 299 parcelas permanentes, das quais 155 são referentes ao manejo de talhadia e 144 ao regime de alto fuste para povoamentos de *Eucalyptus urograndis*. Os dados climáticos foram obtidos de 31 estações meteorológicas distribuídas sobre a área do estudo. O modelo de Von-Bertallanfy Richards modificado polimórfico com comum assíntota foi o que apresentou a melhor performance para os dois regimes de manejo. As variáveis precipitação média mensal e distribuição dos dias de chuva foram utilizadas para expandir os parâmetros do modelo. O condicionamento dos coeficientes por modificadores climáticos trouxe ganho em precisão das estimativas. Além disso, foi possível a geração de cenários de desenvolvimento, a partir das variações climáticas interanuais. A pesquisa também mostra que as variáveis precipitação média mensal e número de dias de chuva foram as mais relacionadas com a capacidade produtiva do local. Esses fatores apresentaram efeito linear positivo sobre o potencial do sítio em produzir madeira. Essa metodologia ainda permite aos gestores florestais prever cenários de produtividade sobre alterações climáticas interanuais, bem como expectativa do crescimento para locais sem dados históricos de plantios.

Palavras-chave: Crescimento. Diferença algébrica. Altura dominante.

## GENERAL ABSTRACT

The site production capacity in forest modeling is represented by the site index or projection of dominant height at the reference age. The site rating is the key to the whole prognosis system. However, methods related with increase of accuracy and flexibility of equations are important to create productivity scenarios due to climate changes. The overall objective of this study was to relate forest development with climate variables. Firstly, we aimed to propose a flexible model seeking to represent the dominant height growth. Then, we sought to identify climatic variations that affect the site capacity in wood production, and how. The research was related with the development of eucalyptus stands under the tall trees and coppice management regimes in Midwest Region of the State of Espirito Santo and Southern Bahia. Data were obtained on 299 permanent plots of stands of *Eucalyptus urograndis*, from which 155 are related with the coppice management regime and 144 are related with high tree-trunk management regime. Climatic data were obtained from 31 meteorological stations distributed in the area under study. The polymorphic modified Von-Bertalanfy Richards model with common asymptote showed the best performance for both two management regimes. The mean monthly rainfall and distribution of rainy days were used to expand the model parameters. The climatic conditioning of coefficients brought gains in terms of accuracy of estimates. In addition, it allowed the generation of development scenarios from interannual climate variations. This survey also showed that the mean monthly rainfall and number of rainy days were the most related variables with the site productive capacity. These factors showed positive linear effect on the site capacity to produce wood. Therefore, this methodology allows managers to predict forest productivity scenarios on interannual climate changes, as well as the expectation of growth for sites without historical data of plantations.

Key-words: Growth. Algebraic difference. Dominant height.

## LISTA DE FIGURAS

### PRIMEIRA PARTE

- Figura 1 Relação entre as formulações empíricas e processuais .....24
- Figura 2 Modelo de Chapman-Richards e o significado das constantes .....31

### SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

#### ARTIGO 1

- Figura 1 Distribuição das parcelas e estações meteorológicas para a área do estudo.....51
- Figura 2 Distribuição dos resíduos em relação aos valores preditos para os modelos M1 (a) e M3 (b) no regime de manejo do alto fuste....66
- Figura 3 Resíduos em termos médios (a) e absolutos (b) da projeção em altura dominante em função das classes de idade para o regime de manejo do alto fuste.....67
- Figura 4 Distribuição dos resíduos em relação aos valores preditos para os modelos M1 (a) e M3 (b) no regime de manejo da talhadia.....67
- Figura 5 Resíduos em termos médios (a) e absolutos (b) da projeção em altura dominante em função das classes de idade para o regime de manejo da talhadia .....68
- Figura 6 Curvas de índices de sítios com idade de referência de 7 anos para os modelos M1 (a) e M3 (b) no regime de manejo de alto fuste .....70
- Figura 7 Curvas de índices de sítios com idade de referência de 7 anos para os modelos M1(a) e M3 (b) no regime de manejo da talhadia .....71



Figura 8	Resíduos em termos médios (a) e absolutos (b) da projeção da altura dominante pelo ajuste tradicional (M1) e por este modelo expandido com o acréscimo da variável media da precipitação mensal (M1_B) para o regime de manejo do alto fuste .....	77
Figura 9	Resíduos em termos médios (a) e absolutos (b) da projeção da altura dominante pelo ajuste tradicional (M1) e por este modelo expandido com o acréscimo da variável media da precipitação mensal e distribuição do total precipitado ao longo do ano (M1_A) para o regime de manejo da talhadia .....	81
Figura 10	Curvas de sítios geradas considerando os três cenários climáticos para o regime de manejo do alto fuste para os sítios III (a), II (b) e I (c).....	86
Figura 11	Curvas de sítios geradas considerando os três cenários climáticos para o regime de manejo da talhadia para os sítios III (a), II (b) e I (c).....	89

## **ARTIGO 2**

Figura 1	Classificação climática do Brasil com base nos critérios de Koeppen (1936), adaptado de Alvares et al. (2013).....	106
Figura 2	Distribuição das parcelas e estações meteorológicas para a área do estudo.....	110
Figura 3	Curvas de índices de sítios com idade de referência de 7 anos para o eucalipto no regime de talhadia .....	115
Figura 4	Variações climáticas interanuais médias da precipitação e dias de chuvas (a), temperatura média e radiação (b), temperatura máxima e déficit de pressão de vapor (c) e temperatura	

	mínima (d) para a região do estudo durante o período de 1994-2014.....	118
Figura 5	Distribuição dos resíduos dos modelos climáticos MC1 (a), MC2 (b), MC3 (c), MC4 (d), MC5 (e) e MC3 (f) em relação aos valores preditos de $SI_7$ .....	124
Figura 6	Efeito da precipitação e número de dias de chuva sobre o índice de sítio na idade de 7 anos ( $SI_7$ ).....	127

## LISTA DE TABELAS

### PRIMEIRA PARTE

Tabela 1	Exemplo de tabela de produção para Abeto da Noruega na Alemanha.....	17
----------	--	----

### SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

#### ARTIGO 1

Tabela 1	Estatísticas descritivas referentes ao regime de manejo de alto fuste .....	50
Tabela 2	Estatísticas descritivas referentes ao regime de manejo de talhadia .....	50
Tabela 3	Estatísticas descritivas referentes às variáveis climáticas (valores das variáveis são dados médios anuais).....	51
Tabela 4	Modelo base e equações dinâmicas derivadas de uma aproximação GADA ( $h = hd$ ; $h_0 = hd_0$ ).....	54
Tabela 5	Parâmetros estimados, estatísticas de ajuste e estatísticas de validação dos modelos candidatos para o regime de manejo de alto fuste .....	62
Tabela 6	Parâmetros estimados, estatísticas de ajuste e estatísticas de validação dos modelos candidatos para o regime de manejo de talhadia .....	64
Tabela 7	Coeficientes do modelo M1 com parâmetros expandidos em função das variáveis climáticas e estatísticas do ajuste para o regime de manejo do alto fuste .....	76
Tabela 8	Coeficientes do modelo M1 com parâmetros expandidos em função das variáveis climáticas e estatísticas do ajuste para o regime de manejo da talhadia.....	79

Tabela 9	Impacto dos cenários climáticos no índice de sítio para o regime de manejo do alto fuste. ....	85
Tabela 10	Impacto dos cenários climáticos no índice de sítio para o regime de manejo da talhadia.....	88

## **ARTIGO 2**

Tabela 1	Estatísticas descritivas referentes ao regime de manejo de talhadia .....	107
Tabela 2	Estatísticas descritivas das variáveis climáticas .....	109
Tabela 3	Modelos candidatos para estimativa do $SI_7$ a partir de variáveis climáticas .....	112
Tabela 4	Coefficiente de correlação de Pearson entre $SI_7$ e variáveis climáticas .....	119
Tabela 5	Parâmetros estimados, estatísticas do ajuste e validação cruzada dos modelos candidatos para $SI_7$ sensíveis ao clima .....	121
Tabela 6	Capacidade produtiva do sítio durante o período da pesquisa .....	127

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE</b>	
1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
2	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	16
2.1	História da mensuração florestal.....	16
2.2	Classificação do sítio florestal.....	19
2.3	Construção do índice de sítio florestal .....	20
2.4	Modelos de crescimento e produção florestal .....	22
2.4.1	Modelos descritivos ou empíricos .....	24
2.4.2	Modelos baseados em processos ou mecanicistas .....	26
2.4.3	Aproximação entre modelos descritivos e processuais .....	28
2.5	Desenvolvimento arbóreo .....	29
2.5.1	Variáveis climáticas influenciando o desenvolvimento arbóreo ...	31
3	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	34
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	35
	<b>SEGUNDA PARTE - ARTIGOS</b> .....	42
	<b>ARTIGO 1 Modelagem do crescimento em altura dominante de plantios de eucalipto com parâmetros condicionados a variações climáticas</b> .....	42
1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	44
2	<b>METODOLOGIA</b> .....	48
2.1	Caracterização fisiográfica e socioeconômica da área de estudo..	48
2.2	Amostragem e obtenção dos dados.....	49
2.3	Projeção da altura dominante .....	52
2.4	Avaliação das equações dinâmicas .....	56
2.5	Expansão do parâmetro do modelo a partir da inserção de variáveis climáticas .....	59
2.6	Cenários de produtividade a partir de variações climáticas.....	60
3	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	61
3.1	Seleção da equação dinâmica para cada regime de manejo .....	61
3.2	Condicionamento dos parâmetros a partir de variáveis climáticas nos modelos selecionados para cada regime de manejo.....	72
3.3	Criação de cenários de variações climáticas interanuais com os modelos condicionados a inserção de variáveis climáticas .....	82
4	<b>CONCLUSÃO</b> .....	91
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	93
	<b>ARTIGO 2 Potencial impacto das alterações climáticas sobre a produtividade do sítio de plantações de eucalipto no Brasil</b> .....	100
1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	102

2	<b>METODOLOGIA</b> .....	105
2.1	<b>Caracterização fisiográfica e socioeconômica da área de estudo</b>	105
2.2	<b>Amostragem e obtenção dos dados</b> .....	106
2.3	<b>Projeção da altura dominante</b> .....	110
2.4	<b>Modelagem do índice de sítio sensível ao clima</b> .....	111
2.5	<b>Avaliação das equações de sítio sensíveis ao clima</b> .....	112
2.6	<b>Cenários de produtividade a partir de variações climática</b> .....	114
3	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	115
3.1	<b>Seleção do Modelo para estimativa do índice de sítio</b> .....	115
3.2	<b>Comportamento das variáveis climáticas</b> .....	116
3.3	<b>Índice de sítio e variáveis climáticas</b> .....	119
3.4	<b>Sensibilidade climática do modelo de índice de sítio</b> .....	125
4	<b>CONCLUSÃO</b> .....	129
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	131

## **PRIMEIRA PARTE**

### **1 INTRODUÇÃO**

A maneira mais concisa de direcionar o planejamento de uma empresa se dá por meio do desenvolvimento de modelos que consigam representar a dinâmica natural do crescimento de um povoamento florestal.

Para tanto, a modelagem do crescimento florestal precisa ser cuidadosamente desenvolvida, uma vez que o eucalipto, espécie mais importante do setor florestal brasileiro do ponto de vista econômico, apresenta sensibilidade quanto às mudanças ambientais, sejam elas de ordem climática ou não.

O ponto crucial para modelar o crescimento do eucalipto, passa pela classificação de sítio, ou seja, uma função que utiliza o estado atual das variáveis consideradas (altura dominante e idade para variados tempos), os quais são facilmente coletados a partir de inventários florestais, para estudar o seu passado ou prever seus estados futuros (CIESZEWSKI, 2001). A classificação de sítio define a capacidade da região em produzir madeira, ou seja, é um indicativo do potencial do local, o que requer extremo cuidado no momento de seu desenvolvimento.

Porém, essa forma de obtenção da qualidade produtiva do sítio não possibilita prever mudanças na curva de crescimento em decorrência de variações climáticas, as quais, segundo Landsberg (2003), são as principais causas para maior ou menor desenvolvimento do povoamento.

Assim, foi proposta uma metodologia para incorporar variáveis climáticas nos modelos descritivos utilizados para a classificação da capacidade produtiva de plantios de eucaliptos no Brasil. As variações climáticas interanuais geram flexibilidade fisiológica no modelo matemático.

O primeiro artigo teve como objetivo propor uma metodologia apropriada para representar a capacidade produtiva dos plantios de eucalipto localizados na Bahia e no Espírito Santo com a posterior expansão do modelo empírico, a partir da entrada de variáveis climáticas, as quais possibilitam a geração de cenários em função de possíveis alterações climáticas interanuais.

Objetivou-se, no segundo artigo, identificar quais as variáveis climáticas de maior impacto para representar a capacidade produtiva de plantios clonais de eucalipto e como essas variáveis afetam o potencial do local em produzir madeira.



## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 História da mensuração florestal**

As primeiras abstrações e modelos de florestas foram os mapas. Esses mapas eram responsáveis por exibirem as disponibilidades e localizações dos recursos destinados para caça, colmeia, pastagem e madeira. Portanto, já refletiam o conceito de uso múltiplo (PRETZSCH, 2010). A subsequente história dos modelos florestais se refere a diferentes tipos com diversos objetivos e conceitos desenvolvidos de acordo com as necessidades e capacidades de cada época. Nesse sentido, a história da modelagem do crescimento permite expandir o conhecimento sobre as funções e estruturas florestais, bem como o aumento da sofisticação dos métodos de previsão do crescimento.

A ideia de modelar o crescimento do povoamento florestal começou com as experiências em tabelas de produção. Inicialmente foram desenvolvidas para grandes áreas e com a evolução das pesquisas florestais, as informações foram refinadas para sítios específicos. Objetivou-se avaliar o comportamento de variáveis como área basal, altura e volume ao longo do tempo. A partir desse conhecimento, estabeleciam o planejamento de acordo com as necessidades da época.

A formulação de uma tabela de produção concentra, basicamente, em três relações. Elas são estatisticamente derivadas de uma grande quantidade de dados monitorados em longo prazo de uma rede de parcelas permanentes. A primeira relação se refere à altura em função da idade, sendo dividida em certo número de curvas de altura, as quais formam a base para a construção das tabelas. A relação subjacente e não menos importante no processo é descrita como o volume do povoamento em função da altura. A partir dos passos anteriores, é possível determinar o volume total do povoamento em função da

idade, sendo essa, denominada de terceira e última relação no processo de geração das tabelas de produção (SKOVSGARD; VANCLAY, 2008).

As primeiras instruções para a construção de tabelas de produção vieram do trabalho de Réaumur em 1721. A partir do século XVIII, Paulsen (1795) desenvolveu as primeiras tabelas de produção para a Alemanha. As tabelas desenvolvidas nesse período representam as primeiras gerações dos modelos de crescimento do povoamento. Esses modelos apresentavam conjunto de dados restritos, limitações regionais e diferentes métodos para geração das tabelas, como pode ser observado na Tabela 1, desenvolvida para povoamentos de abeto da Noruega em diferentes idades e sítios localizados na Alemanha (PRETZSCH, 2010).

Tabela 1 Exemplo de tabela de produção para Abeto da Noruega na Alemanha

Jahre.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.
20	269	450	652	813	994	1175	1356	1538	1719	1900
21	290	485	680	875	1071	1266	1461	1656	1851	2047
22	311	520	730	939	1149	1358	1568	1777	1987	2196
23	333	557	781	1005	1229	1453	1677	1901	2124	2349
24	355	593	832	1071	1310	1549	1788	2026	2265	2504
25	377	631	885	1139	1393	1646	1900	2154	2408	2662
26	400	669	939	1208	1477	1747	2016	2285	2555	2824
27	423	708	993	1278	1563	1848	2133	2418	2703	2989
28	447	748	1049	1350	1651	1952	2233	2554	2855	3156
29	471	788	1106	1423	1740	2057	2375	2692	3009	3327
30	495	830	1163	1497	1831	2165	2499	2832	3166	3500
31	520	871	1222	1573	1923	2274	2625	2975	3326	3677
32	546	914	1282	1649	2017	2385	2753	3120	3488	3856
33	572	957	1342	1728	2113	2498	2883	3268	3653	4039
34	598	1001	1404	1807	2210	2613	3015	3418	3821	4224
35	625	1046	1467	1887	2308	2729	3150	3571	3992	4413
36	652	1091	1530	1969	2408	2848	3287	3726	4165	4604
37	679	1137	1595	2053	2510	2968	3426	3883	4341	4799
38	707	1183	1660	2137	2613	3089	3566	4042	4519	4995
39	735	1231	1726	2222	2717	3213	3709	4205	4701	5197
40	764	1279	1793	2308	2822	3338	3853	4369	4884	5400
41	794	1328	1861	2395	2928	3464	4000	4534	5070	5606
42	823	1377	1929	2481	3035	3590	4145	4701	5256	5812
43	853	1426	1998	2570	3143	3718	4295	4870	5445	6020
44	882	1475	2067	2660	3252	3847	4443	5038	5633	6229
45	912	1525	2137	2750	3362	3977	4593	5208	5824	6438
46	942	1575	2207	2840	3472	4107	4743	5378	6013	6649
47	972	1625	2277	2930	3583	4239	4894	5549	6205	6860
48	1002	1675	2358	3021	3695	4370	5046	5721	6397	7073
49	1032	1726	2420	3113	3807	4502	5198	5894	6590	7286
50	1062	1777	2491	3205	3920	4636	5352	6068	6785	7500
51	1093	1828	2563	3297	4034	4770	5507	6244	6981	7717
52	1123	1880	2636	3392	4149	4906	5664	6421	7179	7936
53	1156	1934	2711	3488	4266	5044	5823	6602	7380	8159
54	1188	1987	2786	3584	4384	5184	5984	6785	7584	8384
55	1220	2041	2862	3682	4504	5325	6147	6970	7791	8613
56	1253	2096	2939	3781	4625	5468	6313	7157	8001	8844
57	1286	2152	3017	3881	4747	5613	6480	7347	8213	9079
58	1320	2208	3096	3983	4871	5760	6649	7539	8427	9316
59	1354	2265	3175	4086	4997	5909	6821	7734	8645	9557

Fonte: adaptado de Pretzsch (2010).

Em decorrência da necessidade de informações mais refinadas sobre o desenvolvimento dos povoamentos, Weise (1880) desenvolveu tabelas referentes à segunda geração dos modelos de crescimento. Essas tabelas apresentavam as características mais importantes do povoamento, tais como: número de fuste, altura média, diâmetro médio, área basal, fator de forma, crescimento periódico médio, produção total de volume e crescimento anual médio.

As tabelas, no início do século XX, desenvolvidas por Gehrhardt (1923, 1930), podem ser consideradas como protótipos de uma terceira geração dos modelos de crescimento. Essas tabelas foram desenvolvidas para as espécies mais importantes da Europa, sendo levado em consideração o crescimento das árvores por meio de formulações matemáticas.

Nas décadas de 50 e 60, essa geração de modelos envolvendo um suporte computacional foi amplamente empregada em trabalhos como de Assmann e Franz (1965), Faber (1966) e Myer (1953). O elemento central dessas tabelas consiste em um sistema de equações matemáticas flexíveis. Essas equações foram ajustadas utilizando dados estatísticos dos locais de estudos. Sendo, posteriormente, transferidos para programas computacionais, onde a produção era prevista em função do regime de manejo, índice de sítio e nível de rendimento do povoamento.

Desde a década de 60, uma quarta geração dos modelos de crescimento foi desenvolvida, denominados de simuladores modernos do crescimento. Curtis (1982) e Hoyer (1975) foram alguns dos trabalhos da época, envolvendo esses tipos de modelos. Esses simuladores de crescimento previam o desenvolvimento do povoamento sob diferentes alternativas de manejo e condições do sítio. Diferentemente das tabelas de produção anteriormente desenvolvidas, a tabela de rendimento gerada por esses simuladores representa apenas uma resposta dos muitos processos de crescimento possíveis de serem simulados.

## 2.2 Classificação do sítio florestal

Uma das atividades básicas para o planejamento do empreendimento florestal é a determinação da capacidade de produção das áreas que estão sendo manejadas, as quais podem ser definidas, por meio do índice de sítio do local.

O conceito de sítio quando está relacionado à floresta de produção se refere à capacidade do local para produzir madeira. Na concepção da ecologia, sítio é o local onde as condições bióticas e geofísicas estão estáveis. Dessa forma, Scolforo (2006) classificou sítio como o somatório dos fatores ambientais influenciando a produção de uma dada espécie florestal em um dado local ou região.

De acordo com Clutter et al. (1983), a determinação da qualidade do sítio florestal pode ser feita, por meio dos métodos diretos e indiretos. Os métodos indiretos avaliam o potencial produtivo do sítio, a partir de atributos do ambiente, sendo levado em consideração características como clima, solo e vegetação. Em contrapartida, os métodos diretos utilizam indicadores da própria vegetação, tais como volume, área basal e altura dominante, os quais refletem a interação de todos os fatores ambientais e de manejos sobre o sítio (SCOLFORO, 2006).

As primeiras tentativas de avaliar e classificar o potencial produtivo de uma área florestal tiveram uma abordagem mais relacionada com os atributos do ambiente. Era comum o uso de uma classificação mais geral, sendo levado em consideração o teor de argila no solo, a altitude e a capacidade de desenvolvimento de árvores (SKOVSGARD; VANCLAY, 2008).

A introdução da classificação de sítio baseada na altura do povoamento foi consequência de mais de 100 anos de experiência com as tabelas. Heyer (1841) foi o primeiro a identificar em termos científicos, uma correlação entre o crescimento em altura e o crescimento em volume. Porém, Baur (1876) foi o

primeiro a construir uma tabela de produção com a classificação de sítio baseada na altura do povoamento. Na sequência, vários pesquisadores da Alemanha sugeriram a altura como indicador da produtividade do sítio.

Atualmente, utiliza-se a altura dominante numa idade de referência para a classificação de sítio. A altura dominante é a variável dendrométrica que melhor se aplica como indicador de produtividade do sítio, em razão da facilidade de determinação no campo, boa correlação com a produção volumétrica e é pouca afetada pela densidade do povoamento (SCOLFORO, 2006).

Nesse sentido, vários trabalhos foram desenvolvidos sobre a classificação de sítios florestais, os quais consideram diferentes espécies, métodos de ajustes dos modelos e a história dessa classificação. Sendo oportuno destacar as pesquisas de Alemdag (1991), Assman (1970), Bailey e Clutter (1974), Batho e Garcia (2006), Cajander (1926), Cao e Durand (1991), Machado (1980), Scolforo (1992) e Skovsgard e Vanclay (2008).

### **2.3 Construção do índice de sítio florestal**

Em trabalhos envolvendo a projeção do crescimento é imprescindível uma correta determinação da capacidade produtiva do local e, para isso, uma das formas é obter o Índice de Sítio.

As curvas de sítios são geradas a partir de equações de índices de local, com as quais a capacidade produtiva do lugar é representada de forma quantitativa. Essas equações são derivadas de relações funcionais envolvendo a variável altura dominante e a variável independente idade. Vários modelos são utilizados para isso, sendo mais comuns os exponenciais e os sigmoidais. Cada curva representa um índice de local, o qual se refere à altura média das árvores dominantes numa idade de referência. Essa idade é escolhida arbitrariamente,

porém, recomenda-se ser próxima da idade técnica de corte (CAMPOS; LEITE, 2013).

Segundo Burkhart e Tomé (2012), os dados necessários para o desenvolvimento do índice de sítio podem ser obtidos, por meio de parcelas permanentes, parcelas temporárias e análise do tronco. As parcelas permanentes do inventário florestal são a forma mais eficiente para esse tipo de estudo, uma vez que as parcelas temporárias podem não detectar exatamente as diferenças de crescimento entre um ano e outro. Uma alternativa é utilização da análise do tronco, porém, esse método se limita às espécies com formação anual bem visível dos anéis de crescimento.

A capacidade produtiva, por meio de índices de local pode ser representada por uma tabela ou feixe de curvas, as quais são provenientes de uma equação de regressão. As curvas geradas podem ser subdivididas em anamórficas ou polimórficas. As curvas anamórficas apresentam a mesma tendência de crescimento para todos os locais. Por outro lado, as curvas polimórficas mostram padrões diferentes de crescimento (SCOLFORO, 2006).

Nesse sentido, existem vários métodos para a construção do índice de sítio. De acordo com Campos e Leite (2013), essas formas podem ser denominadas:

- a) Método da curva média;
- b) Método da atribuição preliminar de índices de local;
- c) Método da equação das diferenças;
- d) Método de Hammer;
- e) Método da predição de parâmetros.

Os métodos da curva média e de Hammer podem ser aplicados com dados de parcelas permanentes ou temporárias. Outro fator importante é que

essas duas formas produzem apenas curvas anamórficas. Os demais métodos exigem dados de parcelas permanentes ou de análise do tronco. Além disso, diferenciam dos outros dois métodos, pois podem gerar curvas polimórficas. Esse polimorfismo retrata melhor o crescimento biológico, ou seja, para sítios mais produtivos tende a ter a forma sigmoideal mais pronunciada. Ao passo que em sítios menos produtivos, o ponto de inflexão é atingido mais tarde (SCOLFORO, 2006).

#### **2.4 Modelos de crescimento e produção florestal**

Como relatado nos itens anteriores, o setor florestal tem uma longa tradição no uso de métodos quantitativos para extrapolar e projetar a produção com base em dados oriundos das observações de campo. Os modelos são capazes de simular um sistema real, sendo utilizadas equações matemáticas para descrever o comportamento de uma determinada variável. Sendo assim, um modelo de crescimento pode conter um sistema de equações, as quais permitem prognosticar o crescimento e produção sobre várias condições edafoclimáticas e tratamentos utilizados no povoamento (SPATHELF; NUTO, 2000).

Compreender o potencial produtivo de uma floresta ao longo do tempo é fundamental para o planejamento florestal. Os modelos de crescimento e produção são a principal ferramenta para a estimativa dessa produtividade. Portanto, quanto maior a precisão dos modelos, melhor será a qualidade das decisões provenientes do planejamento (FERREIRA, 2009).

A projeção da condição futura do povoamento florestal é, geralmente, em função do tamanho e das condições atuais das árvores. Características que podem aumentar a qualidade dessas projeções incluem o índice de sítio do povoamento nos quais as árvores estão inseridas, bem como a altura, diâmetro, densidade e idade atual das árvores (SCOLFORO, 2006).

Segundo Vanclay (1994), a modelagem e a coleta de dados formam um processo interativo. A forma do modelo dita os dados necessários para que o trabalho de campo seja eficiente. Porém, leva-se tempo para a aquisição de dados suficientes à modelagem. Os dados são obtidos por remedições de amostras permanentes para satisfazerem as análises estatísticas e a obtenção de consistência sobre a dinâmica do povoamento.

O avanço na área computacional facilitou e ampliou a utilização da modelagem no setor florestal. Nesse sentido, o computador se tornou uma ferramenta indispensável na aplicação de modelos. O estabelecimento de entradas e saídas informatizadas proporcionou novas oportunidades, sobretudo, em termos de visualização dos resultados em tabelas e gráficos. Em contrapartida, os modelos que envolvem alta complexidade de cálculos e vários fatores influenciando também, podem apresentar desvantagens no processo de modelagem, uma vez que se tornam mais difíceis de serem compreendidos (SPATHELF; NUTO, 2000).

De acordo com Maestri (2003), os usos potenciais de um modelo dependem do objetivo para o qual ele foi desenvolvido, das escalas espaciais e temporais de operação e das premissas assumidas no processo de modelagem. As formulações mecânicas ou descritivas dos modelos definem a capacidade de generalidade e habilidade de predição.

Diante disso, um gráfico proposto por Scolforo (2006) ilustra a habilidade dos modelos biométricos e dos modelos baseados em processos (Figura 1). É importante destacar que, se o objetivo é obter uma informação mais generalizada, recomenda-se empregar os modelos processuais. Nessa situação, a precisão da informação é inferior. Por outro lado, os modelos descritivos são restritos à base de dados considerada na sua formulação, no entanto, apresentam maior precisão, conforme apresentado a seguir:



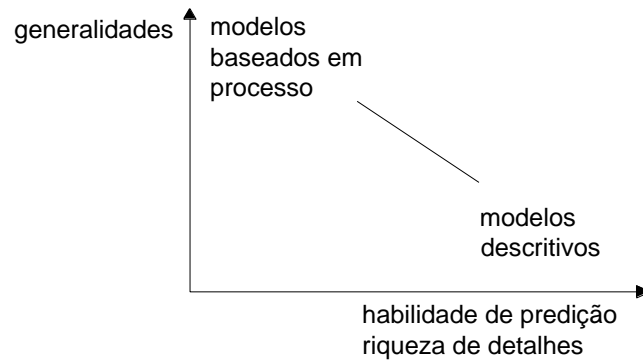


Figura 1 Relação entre as formulações empíricas e processuais

Fonte: Adaptado de Scolforo (2006).

#### 2.4.1 Modelos descritivos ou empíricos

De acordo com Clutter (1983), os modelos empíricos foram os primeiros a serem utilizados no setor florestal, os quais tiveram origem nas tabelas de produção normais de povoamentos completamente estocados. Esses modelos foram desenvolvidos na Alemanha, antes do fim do século XVIII (SPURR, 1952).

Esses modelos representam indiretamente o efeito do ambiente e das práticas silviculturas no desenvolvimento das árvores de um povoamento florestal. Dessa forma, não respondem muito bem a detalhes do processo de crescimento da floresta, no entanto são utilizados com sucesso para prever a produção de madeira, a qual é um dos elementos essenciais do manejo propriamente dito (CAMPOS; LEITE, 2013).

Os modelos descritivos são derivados de uma grande massa de dados provenientes do inventário florestal, portanto, descreve o comportamento da floresta em função de variáveis como índice de sítio, idade, densidade e área basal. Sendo assim, a maior vantagem desse procedimento é obter a melhor descrição da relação entre os dados coletados em campo e as variáveis

determinantes do crescimento, por meio de modelos estatísticos (KIMMINS, 1990).

Diante disso, os modelos de crescimento e produção empíricos podem ser classificados como: modelos de crescimento e produção em nível de povoamento, modelos de distribuição diamétrica e modelos em nível de árvores individuais (SCOLFORO, 2006).

Um sistema de equações com estimativas do volume por unidade de área é definido como modelo do tipo povoamento total. A técnica consiste na projeção das informações com base nas características do povoamento como área basal, índice de sítio e idade. O modelo de povoamento total de Clutter (1963) é aplicado com muita frequência no manejo de plantações não desbastadas (DIAS et al., 2005).

Os modelos de crescimento e produção em nível de povoamento não exprimem diretamente a variação do tamanho das árvores dentro do povoamento. O crescimento do povoamento é estimado por unidade de área independente da classe de tamanho da árvore (CAMPOS; LEITE, 2013).

A transição para novos conceitos de desbaste intensivo alterou o nível de informação requerida no setor florestal. Dessa forma, a ênfase na modelagem passou a ser por classe de tamanho, ao invés de valores médios do povoamento (PRETZCH, 2010). Isso resultou na confecção dos modelos de distribuição diamétrica, os quais apresentam como característica fundamental estimar o número de árvores por classe de diâmetros. Dessa forma, possibilitam a avaliação econômica de multiprodutos bem como flexibilidade para serem feitas simulações de desbaste (BURKHART; CAO; WARE, 1981).

Clutter e Bennett (1965) foram os primeiros pesquisadores a empregar essa técnica de modelagem, sendo, posteriormente, difundida e utilizada na prognose de plantios e florestas. O procedimento se mostrou eficiente quando empregado na modelagem de florestas naturais. Para tanto, aplica-se uma função

densidade de probabilidade. Importante destacar a função de Weibull, a qual é a mais utilizada na descrição da distribuição diamétrica de plantios florestais e florestas multiâneas e heterogêneas (BATISTA, 1989).

Ao contrário dos outros tipos de modelos, os quais simulam o desempenho da floresta com base em dados no nível do povoamento ou por meio da distribuição diamétrica, nos modelos por árvore individual as informações são dadas no nível de árvore. Além disso, podem requerer o conhecimento da posição espacial de cada árvore. Assim, classificados como dependentes ou independentes da distância (SOARES, 1999).

Nesses tipos de modelos, assume-se que o crescimento do povoamento pode ser captado pela soma das alterações observadas em cada árvore, a qual representa a unidade básica do povoamento. Portanto, os modelos por árvore individual apresentam um nível de resolução maior em relação às tabelas de produção e os modelos de distribuição (PRETZCH, 2010).

Assim sendo, os modelos por árvore individual são uma ferramenta adequada para a previsão do crescimento e produção em diversas estruturas de povoamentos puros e mistos. Esses modelos foram desenvolvidos em programas computacionais, os quais permitem ao manejador uma simulação interativa do desempenho de um povoamento específico (PRETZCH, 2010).

#### **2.4.2 Modelos baseados em processos ou mecanicistas**

Na área florestal, os modelos mecanísticos têm sido desenvolvidos desde a década de 1970 e contribuem para a compreensão de como os fatores ambientais afetam o crescimento. Esses modelos podem auxiliar na estimativa da produtividade potencial em área sem histórico de cobertura florestal. Esse tipo de modelagem somente é possível se houver uma perfeita adequação, em

termos espaciais e temporais, entre as medições num inventário florestal e as variáveis ambientais (MAESTRI, 2003).

Os modelos mecanicistas modelam o crescimento considerando processos físicos e biológicos, também conhecidos como mecanismos dos modelos fisiológicos (ABREU, 2000). Esses modelos simulam os processos, ao invés de modelar estatisticamente os dados como fazem os empíricos. Para tanto, necessitam de mais recursos para inicializar, explorar e interpretar o sistema. Além disso, demandam mais tempo, habilidade e multidisciplinaridade de conceitos para serem empregados (TAYLOR; CHEN; VANDAMME, 2009).

Esses modelos levam em consideração a disponibilidade de luz, temperatura e nutrientes na modelagem da fotossíntese, respiração e alocação dos produtos da fotossíntese para diferentes compartimentos da árvore, como raízes, tronco e folhas (LANDSBERG, 2003). Consequentemente, os modelos processuais possuem a capacidade de realizar simulações, estimar a produtividade e o crescimento em relação aos impactos das alterações climáticas e de manejo florestal.

Dentre os modelos baseados em processos, podem ser citados os modelos ecofisiológicos, os modelos baseados no clima e os modelos baseados na arquitetura das árvores. Por exemplo, os modelos baseados no clima sugerem que alterações climáticas podem influenciar o crescimento das árvores, portanto, torna-se necessário desenvolver modelos de crescimento e produção que incluem variáveis ambientais (TEMPS, 2005). Estudos que avaliem a influência das variáveis ambientais no crescimento dos indivíduos, bem como o comportamento da distribuição do crescimento durante o ano vegetativo são importantes para prognose do crescimento e produção.

Com os avanços da tecnologia computacional, aumentou-se, de forma considerável, o uso de modelos florestais baseados em processos. No Brasil, aplica-se cada vez mais a modelagem ecofisiológica com o objetivo de

compreender os mecanismos responsáveis pelo crescimento da floresta e, conseqüentemente, melhorar as tomadas de decisão no planejamento estratégico. Sendo importante destacar os trabalhos de Almeida (2003), Alvares (2011), Borges (2009), Silva (2006) e Stape (2002), e os quais aplicaram o modelo 3-PG para avaliar a produtividade florestal sobre diferentes restrições de crescimento.

### **2.4.3 Aproximação entre modelos descritivos e processuais**

Além dos modelos citados, existem os modelos que combinam um ou mais tipos de modelos de crescimento e produção. Segundo Scolforo (1998), cada vez mais estudos vinculando as duas metodologias devem ser testadas. Uma vez que unir a habilidade preditiva dos modelos descritivos com a capacidade generalista dos modelos processuais, pode melhorar a prognose do crescimento e produção florestal.

No final do século XX, várias pesquisas apresentaram uma análise detalhada da aproximação dos modelos baseados em processos com os modelos descritivos e, conseqüentemente, indicou-se como esse método pode ser aplicado no manejo dos ecossistemas florestais.

Baldwin et al. (1993) combinaram o modelo PTAEDA2 para árvore individual com o modelo MAESTRO baseado em processos. A partir do modelo PTAEDA2 projetam-se as variáveis do povoamento para certa idade. Baseado nessas estimativas, calcula-se a produção de biomassa, por meio do modelo MAESTRO. Em seguida, retorna com o modelo PTAEDA2 para ajustar as predições.

Ainda dentro dessa abordagem, vale ressaltar os trabalhos de Battaglia e Sands (1997) e Battaglia, Sands e Candy (1999), os quais fizeram a junção do modelo processual ProMod com o empírico NitGro. O modelo processual ajustado para estimar o incremento médio anual (IMA), a partir de dados

ambientais e fisiológicos, possibilitou, por meio de relação empírica, estimar o índice de sítio. A prognose da produção foi obtida por modelo empírico baseado no índice de sítio resultante.

No início do século XXI, Almeida et al. (2002) fizeram a combinação do modelo processual 3-PG com o simulador de crescimento E-GROW ARCEL. O modelo 3-PG foi calibrado para estimar o carbono acumulado no tronco para uma determinada idade. Feito isso, as informações foram organizadas para entrar no modelo E-GROW ARCEL, o qual possibilita a estimativa da estrutura diamétrica do povoamento bem como determinação das alturas por classe de diâmetro.

Neste trabalho, segue a ideia da aproximação dos modelos processuais e descritivos, pois, as variáveis climáticas foram utilizadas para sensibilizar o modelo empírico de classificação de sítio florestal.

## **2.5 Desenvolvimento arbóreo**

Antes de entrar na discussão sobre a influência das variáveis climáticas no desenvolvimento da planta, é importante distinguir crescimento de produção. O crescimento se refere ao acréscimo nas dimensões da árvore, tais como: altura, diâmetro, área basal e volume. Por outro lado, a produção está relacionada com o tamanho final, após um período definido de observação (SPATHELF; NUTO, 2010).

Como abordado nos itens anteriores, conhecer e compreender o crescimento florestal é imprescindível para o planejamento das atividades do empreendimento. Segundo Assmann (1970), as taxas de incremento anual em altura e a duração do período de crescimento para algumas espécies europeias dependem das condições climáticas do ano atual e das substâncias de reserva acumuladas na planta durante o último período de crescimento.

Nesse contexto, pesquisas sobre o crescimento de espécies florestais são frequentes, para isso, são utilizadas medições de parcelas permanentes ou análise de tronco. De acordo com Machado et al. (2010), no decorrer da vida de uma árvore ou de um povoamento, o padrão de crescimento acumulado segue uma curva sigmoideal, a qual apresenta uma assíntota, com um ponto de inflexão e outro de máxima tangência. A forma dessa curva depende da espécie em questão e dos fatores responsáveis pelo crescimento.

Ao longo dos anos, no setor florestal, os modelos biomatemáticos vêm sendo empregados para gerar essas curvas, dentre eles pode-se citar os modelos de Chapman-Richards, Gompertz, Logística e Monomolecular. Vale ressaltar que o trabalho de Turnbull (1963) foi o primeiro a utilizar um modelo biológico no setor florestal. A partir de então vários estudos foram desenvolvidos nessa linha, como pode ser observado em Assmann (1970), Machado (1980) e Prodan et al. (1997), os quais comprovam a veracidade do padrão sigmoideal das curvas ao longo da vida das árvores.

De acordo com Pienaar (1965), os modelos Logístico, Gompertz e monomolecular representam um caso específico do modelo de Chapman-Richards, uma vez que esse último generalizou o valor da constante alométrica, a qual foi denominada de “m”.

A fim de facilitar o entendimento, Maestri (2003) representou o modelo de Chapman-Richards bem como a interpretação das constantes dele (Figura 2).

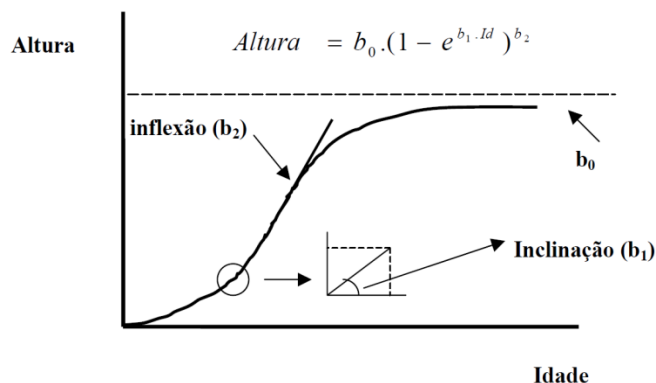


Figura 2 Modelo de Chapman-Richards e o significado das constantes  
 Fonte: Adaptado de Maestri (2003).

Na Figura 2, o coeficiente “ $b_0$ ” representa a máxima altura dominante a ser atingida, “ $b_1$ ” é a taxa de crescimento em altura, “ $b_2$  ( $1/1-m$ )” o ponto de inflexão da curva e “ $T$ ” a idade (MAESTRI, 2003).

### 2.5.1 Variáveis climáticas influenciando o desenvolvimento arbóreo

Segundo Lamprecht (1990), o crescimento das árvores é determinado pela composição genética da espécie em interação com as características do ambiente. As influências ambientais incluem os fatores climáticos, os pedológicos, as características topográficas e a competição entre as árvores.

Shumacher e Meyer (1937) desenvolveram um estudo sobre o efeito do clima na variação do crescimento da floresta e a influência da distribuição da precipitação no desenvolvimento da árvore. Em outro estudo, Brown (1974) verificou algumas influências ambientais sobre o crescimento das árvores, como por exemplo, a luz, a água e a temperatura. Dentre esses constituintes ambientais, constatou-se que a luz apresentou maior influência no



desenvolvimento da árvore, uma vez que a forma e o crescimento são diretamente afetados pela intensidade, qualidade e duração da luz.

A precipitação e a temperatura do ar são as variáveis climáticas mais importantes para a modelagem da produção florestal, como em modelos ecofisiológicos. Portanto, o mapeamento dessas variáveis é fundamental, uma vez que esses modelos permitem compreender, prever e controlar todo o sistema florestal (VIOLA et al., 2010).

Munareto (2007) avaliou a influência das variáveis precipitação e temperatura no incremento em diâmetro de algumas espécies florestais no município de Santa Maria – RS. A análise indicou correlação significativa entre o incremento em diâmetro com as variáveis climáticas para as espécies estudadas. Segundo Benavides et al. (2007), a temperatura do ar é a que mais interfere nos processos fisiológicos das plantas. A temperatura influencia, principalmente, a velocidade das reações químicas e os processos internos de translocação de assimilados (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Em um estudo realizado por Temps (2005), a precipitação apresentou a maior correlação com o incremento corrente anual em altura dominante para povoamento de *Pinus*.

Os primeiros modelos para prognoses do crescimento e produção florestal foram elaborados para espécies de crescimento lento e para populações com idades de rotação altas (CLUTTER et al., 1983). Dessa forma, geram-se bons resultados com os modelos descritivos que consideram as características do sítio, a idade e a densidade da população como variáveis explicativas do crescimento. Porém, quando se trabalha com espécies de rápido crescimento e, portanto, a idade de rotação é mais curta, essa estabilidade não é observada e os referidos modelos nem sempre apresentam inferências eficazes.

O eucalipto no Brasil apresenta maior taxa de crescimento do mundo e estudos comprovam a sensibilidade desse gênero em relação às variáveis do solo

e clima (STAPE, 2002). Isso pode ser comprovado na pesquisa de Ferreira (2009), com a qual se conclui que as seguintes variáveis ambientais: excedente hídrico, precipitação, temperatura média e déficit de pressão de vapor, foram as mais representativas no crescimento do eucalipto.

Para Turnbull (1963), embora as hipóteses do modelo de crescimento baseiem-se em proposições biológicas, existem poucas investigações da relação entre valores estimados dos parâmetros do modelo de crescimento e os fatores do ambiente e do metabolismo. Além disso, com a possibilidade de mudanças significativas no clima em escala global, se torna evidente a necessidade de incluir as variáveis climáticas nos modelos de crescimento e produção, de tal forma que a modelagem possa refletir o efeito dessas alterações sobre o desenvolvimento da árvore.

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O eucalipto é o maior representante do setor florestal no Brasil, em razão das características como rápido desenvolvimento, adaptações à diferentes ambientes e multiprodutos. Assim, estudos relacionados à modelagem do crescimento e produção para essa cultura são importantes para o sucesso do empreendimento florestal.

A capacidade produtiva do local em produzir madeira, definida pela altura dominante na idade de referência, é a chave de todo o sistema de prognose. Os modelos descritivos para a projeção da altura dominante são inflexíveis, pois, levam em consideração apenas as variáveis biométricas, ou seja, retratam os efeitos da interação entre os fatores genéticos, silviculturais e ambientais.

As variações climáticas interanuais têm forte impacto sobre povoamentos florestais de rápido crescimento, como é o caso do eucalipto. O modelo de índice de sítio sem considerar essas variações pode superestimar em um cenário pessimista e subestimar em situação otimista.

Diante do exposto, propõe-se uma metodologia para aumentar o desempenho da classificação de sítio utilizando as variáveis climáticas para modificar o parâmetro do modelo. Além de aumentar a qualidade do ajuste, as variáveis climáticas dão flexibilidade ao modelo matemático permitindo gerar cenários de produtividade, em decorrência das alterações do clima. Esses resultados estão apresentados no primeiro artigo.

No segundo artigo, a capacidade produtiva do local é associada com as condições climáticas, a fim de identificar as variáveis que mais impactam na determinação do índice de sítio bem como analisar o funcionamento dessa relação para plantios clonais de eucaliptos nos estados do Espírito Santo e Bahia.

## REFERÊNCIAS

ABREU, E. C. R. **Modelagem para prognose precoce do volume por classe diamétrica para *Eucalyptus grandis***. 2000. 70 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

ALEMDAG, I. S. National site-index and height-growth curves for white spruce growing in natural stands in Canada. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 21, n. 10, p. 1466-1474, 1991.

ALMEIDA, A. **Application of a process-based model for predicting and explaining growth in *Eucalyptus* plantations**. 2003. 232 p. Thesis (Doctor of Philosophy) - Universidade Nacional da Austrália, Camberra, 2003.

ALMEIDA, A. C. et al. Linking process-based and empirical forest models to use as a practical tool for decision-making in fast growing eucalyptus plantation in Brazil. In: \_\_\_\_\_. **Reality, models and parameter estimation-the forestry scenario**. Lisboa: CABIS, 2002. p. 1-9.

ALVARES, C. A. **Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de *Eucalyptus* no sul do estado de São Paulo**. 2011. 279 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study: studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands**. Oxford: Pergamon, 1970. 520 p.

ASSMANN, E.; FRANZ, F. Vorläufige fichten-ertragstafel für Bayern. **Forstwissenschaftliches Centralblatt**, Berlin, v. 84, n. 1/2, p. 13-43, 1965.

BAILEY, R. L.; CLUTTER, J. L. Base-age invariant polymorphic site curves. **Forest Science**, Bethesda, v. 20, n. 2, p. 155-159, 1974.

BALDWIN, V. C. et al. Linking growth and yield and process models to estimate impact of environmental changes on growth of loblolly pine. **Forest Science**, Bethesda, v. 47, n. 1, p. 77-82, 2001.

BATHO, A.; GARCIA, O. De Perthuis and the origins of site index: a historical note. **FBMIS**, Oxford, v. 1, p. 1-10, Oct. 2006.

BATISTA, J. L. F. **A função Weibull como modelo para a distribuição de diâmetro de espécies arbóreas tropicais**. 1989. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1989.

BATTAGLIA, M.; SANDS, P. Modelling site productivity of Eucalyptus globulus in response to climatic and site factors. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 24, n. 6, p. 831-850, 1997.

BATTAGLIA, M.; SANDS, P. J.; CANDY, S. G. Hybrid growth model to predict height and volume growth in young Eucalyptus globules plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 120, n. 1, p. 193-201, 1999.

BAUR, F. **Die Fichte in bezug auf ertrag, zuwachs und form**. Berlin: Springer, 1876. 58 p.

BENAVIDES, R. et al. Geostatistical modelling of air temperature in a mountainous region of Northern Spain. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 146, n. 3, p. 173-188, 2007.

BORGES, J. S. **Parametrização, calibração e validação do modelo 3-PG para eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais**. 2009. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

BROWN, K. W. Calculations of evapotranspiration from crop surface temperature. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 14, n. 1, p. 199-209, 1974.

BURKHART, H. E.; CAO, Q. V.; WARE, K. D. **A comparison of growth and yield prediction models for loblolly pine**. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute, 1981. 59 p.

BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. Berlin: Springer, 2012. 458 p.

CAJANDER, A. K. The theory of forest types. **Acta Forestalia Fênica**, Helsinki, v. 29, p. 1-108, 1926.

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

CAO, Q. V.; DURAND, K. M. Site index curves for eastern cottonwood plantations in the lower Mississippi Delta. **Southern Journal of Applied Forestry**, Washington, v. 15, n. 1, p. 28-30, 1991.

CIESZEWSKI, C. J. Three methods of deriving advanced dynamic site equations demonstrated on inland Douglas-fir site curves. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 31, n. 1, p. 165-173, 2001.

CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, Bethesda, v. 9, n. 3, p. 354-371, 1963.

CLUTTER, J. L.; BENNET, F. A. **Diameter distributions in old-field slash pine plantations**. Georgia: Forest Research Council, 1965. 9 p. (Report, 13).

CLUTTER, J. L. et al. **Timber management: a quantitative approach**. New York: J. Wiley, 1983. 333 p.

CURTIS, R. O. Notes: a simple index of stand density for Douglas-fir. **Forest Science**, Bethesda, v. 28, n. 1, p. 92-94, 1982.

DIAS, A. N. et al. Emprego de um modelo de crescimento e produção em povoamentos desbastados de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 731-739, set./out. 2005.

FABER, P. J. The growth of the Red oak in the Nertherlands. **Ned Bosbouuw Tijdschr**, v. 38, p. 357-374, 1966.

FERREIRA, M. Z. **Modelagem da influência de variáveis ambientais no crescimento e produção de *Eucalyptus sp.*** 2009. 101 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

GEHRHARDT, E. **Ertragstafeln für Eiche, Buche, Tanne, Fichte und Kiefer.** Berlin: Springer, 1923. 46 p.

GEHRHARDT, E. **Ertragstafeln für reine und gleichartige Hochwaldbestände von Eiche, Buche, Tanne, Fichte und Kiefer, grüner und Lärche.** Berlin: Springer, 1930. 73 p.

HEYER, C. **Die Waldertrags: regelung.** Giesen: Verlag von B. C. Ferber, 1841. 188 p.

HOYER, G. E. **Measuring and interpreting Douglas: fir management practices.** Olympia: Washington State Department of Natural Resources, 1975. 80 p.

KIMMINS, J. P. Modelling the sustainability of forest production and yield for a changing and uncertain future. **The Forestry Chronicle**, Mattawa, v. 66, n. 3, p. 271-280, 1990.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies-possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado.** Eschborn: Universidade de Göttingen/GTZ, 1990. 343 p.

LANDSBERG, J. Physiology in forest models: history and the future. **FBMIS**, Oxford, v. 1, p. 49-63, 2003.

MACHADO, S. do A. Curvas de índice de sítio para plantações de *Pinus taeda* L. região central do Estado do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 11, n. 2, p. 4-18, 1980.

MACHADO, S. do A. et al. Dinâmica de crescimento de plantios jovens de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 62, p. 165-170, maio/jun. 2010.

MAESTRI, R. **Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* considerando variáveis ambientais**. 2003. 143 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

MEYER, H. A. **Forest mensurations**. Valley: State College, 1953. 357 p.

MUNARETO, F. F. **Dendroclimatologia de quatro espécies florestais nativas com potencial silvicultural e econômico**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

PAULSEN, J. C. **Kurze praktische anleitung zum Forstwesen**. Detmold: Verfabt von Einem Forstmanne, 1795. 152 p.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PIENAAR, L. V. **Quantitative theory of forest growth**. 1965. 167 p. Thesis (Ph.D. in Philosophy) - University of Washington, Washington, 1965.

PRETZSCH, H. **Forest dynamics, growth, and yield**. Berlin: Springer, 2010. 664 p.

PRODAN, M. et al. **Mensura forestal**. San José: Deutsche Gsellshaf für Technische Zusammenarbeit, 1997. 586 p.



SCHUMACHER, F. X.; MEYER, H. A. Effect of climate on timber-growth fluctuations. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 54, n. 2, p. 74-107, 1937.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: modelos de crescimento e produção florestal. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 393 p.

SCOLFORO, J. R. S. Curvas de índice de sítio para *Pinus caribaea* var. hondurensis. **Revista do IPEF**, Piracicaba, v. 45, p. 40-47, 1992.

SCOLFORO, J. R. S. **Manejo florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 229 p.

SILVA, G. G. C. **Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de eucalipto em resposta à disponibilidade de água e nutrientes**. 2006. 102 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

SKOVSGARD, J. P.; VANCLAY, J. K. Forest site productivity a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. **Forestry**, Oxford, v. 8, n. 1, p. 13-31, 2008.

SOARES, P. **Modelação do crescimento da árvore em eucaliptais em primeira rotação localizados nas regiões Norte e Centro Litoral**. 1999. 369 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 1999.

SPATHELF, P.; NUTTO, L. **Modelagem aplicada ao crescimento e produção florestal**. Santa Maria: UFSM, 2000. 71 p.

SPURR, S. H. **Forest inventory**. New York: Ronald Press, 1952. 426 p.

STAPE, J. L. **Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in northeastern Brazil**. 2002. 212 p. Thesis (Doctor of Philosophy) - Colorado State University, Fort Collins, 2002.

TAYLOR, A. R.; CHEN, H. Y. H.; VANDAMME, L. A review of forest succession models and their suitability for forest management planning. **Forest Science**, Bethesda, v. 55, n. 1, p. 23-36, 2009.

TEMPS, M. **Adição da precipitação pluviométrica na modelagem do crescimento e da produção florestal em povoamentos não desbastados de *Pinus Taeda L.*** 2005. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

TURNBULL, K. J. **Populationdynamic in mixed forest stands:** a system of mathematical models of mixed stand growth and structure. 1963. 186 p. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Washington, Washington, 1963.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield:** applications to mixed tropical forests. Wallingford: CAB, 1994. 537 p.

VIOLA, M. R. et al. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 9, p. 970-978, 2010.

WEISE, W. **Ertragstafeln für die Kiefer.** Berlin: Springer, 1880. 156 p.

**SEGUNDA PARTE - ARTIGOS**

**ARTIGO 1 Modelagem do crescimento em altura dominante de plantios de eucalipto com parâmetros condicionados a variações climáticas**

**ARTIGO FORMATADO DE ACORDO COM A NBR 6002 (ABNT,2003),  
conforme orienta o Manual de Normalização da UFLA.**

## RESUMO

Objetivou-se, neste estudo, propor uma forma flexível e ao mesmo tempo precisa para representar a capacidade produtiva de povoamentos florestais de *Eucalyptus urograndis*. Para isso, utilizou-se o método da diferença algébrica onde foram testadas 15 equações para modelagem do crescimento em altura dominante. Os modelos foram ajustados a um conjunto de dados provenientes de parcelas permanentes com plantios clonais de eucalipto localizados na Bahia e Espírito Santo. A base de dados foi analisada de forma separada para os regimes de manejo de alto fuste e talhadia. A seleção do melhor modelo ajustado para cada regime de manejo foi baseada em critérios estatísticos de ajuste, validação e análise gráfica. Após a seleção do melhor modelo, esse teve seu parâmetro expandido com a adição de variáveis climáticas que possibilitaram a criação de cenários. O modelo de Von-Bertalanffy Richards modificado polimórfico com comum assíntota foi o que apresentou o melhor desempenho para os dois regimes de manejo. Para o manejo de alto fuste, o condicionamento do parâmetro relacionado à inclinação pela média da precipitação mensal, obteve o maior desempenho. Já, para o manejo de talhadia, o parâmetro referente à assíntota condicionado pela média da precipitação e sua distribuição ao longo do ano proporcionou a melhor performance. Assim, possibilitaram aos modelos flexibilidade biológica causada pelas variações interanuais da precipitação. As expansões dos parâmetros não descaracterizaram o comportamento do modelo de Von-Bertalanffy Richards modificado para os regimes de manejo estudados. O condicionamento climático dos parâmetros da inclinação e assíntota para os dois regimes de manejo trouxe ganho em precisão das estimativas. Além disso, possibilitou geração de cenários de produtividade, a partir da quantidade e distribuição do total precipitado nas áreas estudadas.

**Palavras-chave:** Precipitação, alto fuste, talhadia.

## 1 INTRODUÇÃO

A área de florestas plantadas no mundo é equivalente a 264 milhões de hectares. Desse total, 61% dos povoamentos estão inseridos na China, Índia e Estados Unidos. Enquanto isso, no Brasil, os plantios de *Eucalyptus* e *Pinus* atingiram 7,60 milhões de hectares em 2013, sendo 71,2% referentes aos plantios de *Eucalyptus* sp. Dessa forma, o Brasil contribui com 17% do total da madeira colhida no mundo, muito em razão da alta produtividade das suas florestas, principalmente as do gênero eucalipto (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2014).

A produção florestal brasileira é utilizada como matéria- prima no segmento industrial para a produção de celulose, papel, painéis de madeira, produtos sólidos, carvão, lenha industrial, madeira tratada e cavacos de madeira, sendo a celulose o produto de maior interesse. Dentre os estados brasileiros, na Bahia e no Espírito Santo estão inseridos 15,5% dos maciços florestais de eucalipto para a produção de celulose (IBÁ, 2014).

No ano de 2014, o setor florestal representou uma participação de 1,1% do PIB brasileiro e de 5,5% no PIB industrial (CIRILLO, 2015). Em razão dessa importância na economia nacional, existe a necessidade de se monitorar, periodicamente, os povoamentos florestais como forma de fomentar informações para o planejamento e tomada de decisões de ordem estratégica, tática e operacional (GUEDES et al., 2012).

Esse monitoramento periódico é realizado por meio de delineamentos amostrais que captam de forma eficiente as variações nos

povoamentos ao longo do tempo. A amostragem é constituída por uma rede de parcelas permanentes, sendo esse procedimento de amostragem denominado de Inventário Florestal Contínuo (IFC), o qual fornece as informações de estoque e crescimento anuais (MELLO et al., 2009).

As informações do IFC são a essência para a construção de modelos matemáticos que por prognosticarem a produção futura de madeira, sendo ponto importante para o direcionamento do planejamento florestal da empresa. Nesse contexto, a classificação da capacidade produtiva dos diferentes locais de plantios se torna a chave do processo (POKHAREL; DECH, 2011).

No geral, a prognose de madeira em povoamentos florestais pode ser realizada de duas diferentes formas, as quais advêm de diferentes filosofias de abordagem do crescimento de plantas. A primeira forma é baseada em princípios ecofisiológicos, onde um modelo conceitual é aplicado com o objetivo de identificar os fatores de causa e efeito na produção da biomassa. Esses fatores abordam aspectos climáticos, edáficos e fisiológicos das plantas, para explicar o desenvolvimento das mesmas, ou seja, essa forma de se modelar o crescimento da floresta é fundamental para ações silviculturais e de manejo, porém por se basear em dados climáticos, ela se torna de aplicação regional. A segunda forma é denominada de empírica ou descritiva. Essa abordagem tem como objetivo identificar os padrões de crescimento e produção para as práticas de gestão dos recursos florestais (SAINT-ANDRÉ et al., 2008; TOMÉ et al., 2006). A forma empírica de se prognosticar produção madeireira baseia-se nos dados dendrométricos do IFC se torna específica ao nível do

talhão para as áreas plantadas. Essa prognose é fundamental para guiar o planejamento florestal.

A união dessas duas abordagens, denominada de modelagem híbrida, pode trazer maior precisão das informações, uma vez que as lacunas dos modelos de processos por serem regionais e dos modelos empíricos por não serem sensíveis a variações interanuais climáticas podem ser preenchidas (SCOLFORO et al., 2013). A variação climática interanual apresenta grande impacto no desenvolvimento da eucaliptocultura brasileira (STAPE; BINKLEY; RYAN, 2004). Assim, o desenvolvimento de ferramentas precisas e, ao mesmo tempo, sensíveis a essas variações apresenta grande potencial de aplicação na classificação da capacidade produtiva para o eucalipto no Brasil, uma vez que a capacidade de resposta às variações do clima é significativa na produção dos plantios, decorrente de curta rotação. Por exemplo, um período seco em um dos anos, considerando uma rotação de 7 anos para um povoamento de eucalipto pode afetar drasticamente sua produtividade final (ALMEIDA et al., 2004).

Assim, o presente estudo incorpora variáveis climáticas nos modelos empíricos utilizados para a classificação da capacidade produtiva de plantios de eucalipto no Brasil, país modelo na produção de madeira de rápido crescimento e que apresenta lacuna quanto à observação de ferramentas robustas para possíveis impactos causados pelo clima. A adição da variação climática interanual permite a inserção da sensibilidade fisiológica ao modelo matemático. Adicionalmente, essa sensibilidade ao modelo permite ao manejador florestal avaliar o impacto

na produtividade local, sendo essa característica importante por possibilitar um planejamento de forma mais acurada.

Diante do exposto, conduziu-se este estudo, com os objetivos de representar a capacidade produtiva das áreas de eucalipto localizadas na Bahia e no Espírito Santo; aumentar a performance do modelo descritivo, por meio das variáveis climáticas; geração de cenários de produtividade com possíveis variações climáticas.



## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Caracterização fisiográfica e socioeconômica da área de estudo

Os povoamentos de eucalipto estão localizados nos estados do Espírito Santo e Bahia, com latitude variando de 17°15'S a 20°15'S e longitude de 39°05'W a 40°20'W. O estado da Bahia está localizado na região nordeste do Brasil, sendo o quinto maior em área, o quarto mais populoso e representa o oitavo maior PIB do Brasil (3,8% do PIB nacional). O Espírito Santo está localizado na região sudeste do Brasil, sendo o quarto menor em área, o décimo quarto mais populoso e apresenta o décimo primeiro maior PIB do Brasil (2,4% do PIB nacional) (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2014). Para se ter uma ideia da dimensão desses estados, a soma da área deles é superior à França e à Bélgica juntas.

A classificação climática da área, de acordo com Koppen, oscila de Aw (clima tropical com precipitação superior à 1500 mm) a Am (clima tropical com precipitação inferior à 250 mm) no estado do Espírito Santo e Aw a BSh (clima árido com temperatura média do ar acima de 18°) no estado da Bahia (ALVARES et al., 2013). De acordo com as condições climáticas dos estados da Bahia e do Espírito Santo e mais especificamente da área de estudo, percebe-se que existe uma similaridade climática, mas com um gradiente expressivo em precipitação.

## 2.2 Amostragem e obtenção dos dados

A base de dados foi composta por dados dendrométricos oriundos do inventário florestal contínuo (IFC) e dados climáticos provenientes de estações meteorológicas. As áreas de plantio foram compostas por um único clone de *Eucalyptus urograndis* plantados em espaçamento 3 x 3 m, sendo que as unidades amostrais lançadas apresentaram formato circular com área de 500 m<sup>2</sup> e foram distribuídas de forma sistemática desencontrada (COCHRAN, 1977).

As medições do IFC são referentes ao período de 1994 a 2014, sendo que, para cada parcela, foram mensuradas as circunferências a 1,30 m em relação ao nível do solo (CAP) de todos os indivíduos, a altura das árvores dominantes presentes nas parcelas. As árvores dominantes foram determinadas com base no conceito de Assman (1970).

O manejo das áreas é realizado alternando-se entre os regimes de reforma do povoamento (alto fuste) e condução da brotação (talhadia). O regime de alto fuste ganhou força a partir da década de 1990 com a introdução de materiais genéticos melhorados (GONÇALVES et al., 2013). Para esse regime, foram lançadas 144 parcelas (Figura 1), sendo suas estatísticas descritivas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 Estatísticas descritivas referentes ao regime de manejo de alto fuste

Inventário Florestal Contínuo		Dados do Ajuste		
Variáveis	Unidade	Mínima	Média	Máxima
Idade Inicial ( $t_0$ )	ano	0,900	3,494	7,400
Idade Final ( $t$ )	ano	1,400	4,139	7,900
Altura Dominante na $t_0$ ( $hd_0$ )	m	5,330	18,171	30,000
Altura Dominante na $t$ ( $hd$ )	m	7,580	20,279	30,250
Incremento Anual em Altura Dominante	m	0,053	3,942	11,500
Número de remedições por parcela	-	1,000	4,000	11,000

Após a crise mundial em 2008, a produção de madeira por meio do sistema de condução da brotação passou a receber mais atenção dos silvicultores e pesquisadores (GONÇALVES et al., 2014). Para esse manejo, foram lançadas 155 parcelas (Figura 1), sendo apresentadas, na Tabela 2, suas estatísticas descritivas.

Tabela 2 Estatísticas descritivas referentes ao regime de manejo de talhadia

Inventário Florestal Contínuo		Dados do Ajuste		
Variáveis	Unidade	Mínima	Média	Máxima
Idade Inicial ( $t_0$ )	ano	1,000	3,237	5,800
Idade Final ( $t$ )	ano	1,500	3,918	6,670
Altura Dominante na $t_0$ ( $hd_0$ )	m	6,010	16,935	31,020
Altura Dominante na $t$ ( $hd$ )	m	7,900	19,308	31,100
Incremento Anual em Altura Dominante	m	0,053	3,954	11,500
Número de remedições por parcela	-	1,000	3,000	9,000

Os dados climáticos são provenientes de 31 estações meteorológicas onde foram extraídos valores diários de precipitação,

temperatura e radiação solar referentes ao mesmo período de observação do IFC (Figura 1). Na Tabela 3, mostram-se as estatísticas relacionadas às variáveis climáticas da área do estudo, sendo possível observar uma maior variação para a variável precipitação e para a distribuição do total precipitado nas áreas ao longo do ano (dias de chuva).

Tabela 3 Estatísticas descritivas referentes às variáveis climáticas (valores das variáveis são dados médios anuais)

Variável	Unidade	Maior	Médio	Menor	Desvio Padrão
Dias de Chuva	dias.ano <sup>-1</sup>	233,000	157,007	78,000	29,742
Precipitação	mm.ano <sup>-1</sup>	2467,346	1267,822	512,118	346,504
Temperatura	°C	26,494	23,708	20,843	1,002
Radiação Solar	MJ.m <sup>-2</sup>	20,631	17,620	15,211	0,863
Déficit Pressão de Vapor	kpa	0,579	0,500	0,456	0,030

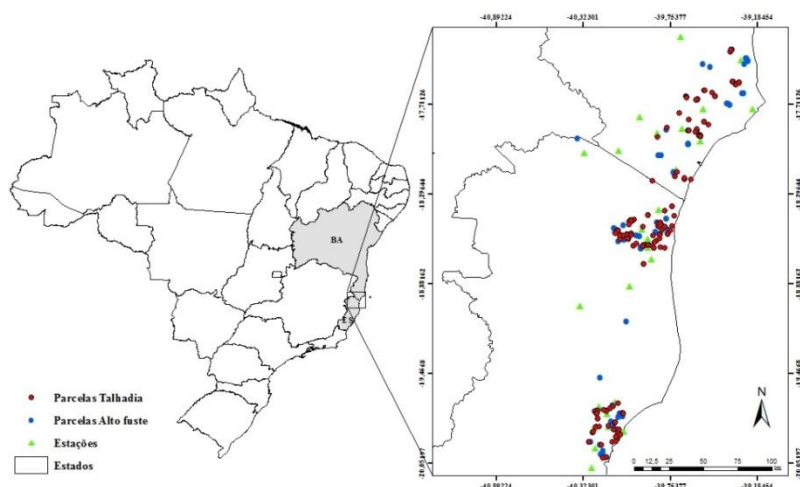


Figura 1 Distribuição das parcelas e estações meteorológicas para a área do estudo

### 2.3 Projeção da altura dominante

O método da diferença algébrica generalizada (GADA) foi utilizado para modelar o desenvolvimento da altura dominante do eucalipto. A GADA possibilita que vários parâmetros possam estar relacionados com a qualidade do sítio, por meio de uma transformação algébrica. De acordo com Cieszewski, Strub e Zasada (2007), o método consiste em: i) escolher uma equação para modelar a variável de interesse; ii) decidir quais os parâmetros serão em função da qualidade teórica do sítio ( $X$ ) e expressar a relação, por meio de uma equação matemática; iii) resolver a equação para  $X$ ; iv) inserir a solução de  $X$  para obter a equação dinâmica de  $hd = f(t, X)$ , para as condições iniciais de  $t_0$  e  $hd_0$ .

No estudo, consideraram-se as situações de um e/ou dois parâmetros dos modelos relacionados com  $X$ . Quando apenas um parâmetro está relacionado com  $X$ , GADA é equivalente à aproximação por diferença algébrica (ADA). A GADA é uma evolução do método desenvolvida por Bailey e Clutter (1974), pois, permite construir curvas polimórficas com múltiplas assíntotas, como apresentado nos trabalhos de Diaz-Maroto et al. (2010) e Nunes et al. (2011).

Um total de 15 modelos dinâmicos para projeção da altura dominante foram selecionados e ajustados com base nos dados do IFC. Os modelos candidatos são apresentados na Tabela 4. Os modelos M2, M4, M7 e M10 são definidos como anamórficos com múltiplas assíntotas, os modelos M1, M5, M8, M11 e M12 são polimórficos com comum

assíntota e os modelos M3, M6, M9, M13, M14 e M15 são polimórficos com múltiplas assíntotas.

Tabela 4 Modelo base e equações dinâmicas derivadas de uma aproximação GADA ( $h = hd$ ;  $h_0 = hd_0$ )

Modelo Base	Parâmetros Relacionados ao sítio	Solução Inicial para X com ( $h_0$ e $t_0$ )	Equação Dinâmica	Referência	Id
Richards (1959) $h = a(1 - \exp(-bt))^c$	$c = X$	$X_0 = \frac{\ln(h_0/a)}{\ln(1 - \exp(-bt_0))}$	$h = a(h_0/a)^{(\ln(1 - \exp(-bt))/(\ln(1 - \exp(-bt_0))))}$	Scolforo (2006)	M1
	$a = X$	$X_0 = \frac{h_0}{(1 - \exp(-bt_0))^c}$	$h = h_0 \left( \frac{1 - \exp(-bt)}{1 - \exp(-bt_0)} \right)^c$	Scolforo (2006)	M2
Logístico $h = a/(1 + b \exp^{-ct})$	$a = \exp(X)$ $c = c_1 + c_2X$	$X_0 = (\ln h_0 - c_1 F_0)/1 + c_2 F_0$ $F_0 = \ln(1 - \exp(-bt_0))$	$h = \exp(X_0)(1 - \exp(-bt))^{c_1 + c_2 X_0}$	Cieszewski (2004)	M3
	$a = X$	$X_0 = h_0(1 + b \exp^{-ct_0})$	$h = X_0/(1 + b \exp^{-ct})$	Cieszewski e Strub (2008)	M4
Logístico modificado Cieszewski (2004) $h = a/1 + bt^{-c}$	$b = X$	$X_0 = (a - h_0)/(h_0 \exp^{-ct_0})$	$h = a/(1 + X_0 \exp^{-ct})$	Cieszewski e Strub (2008)	M5
	$a = b_1X$ $b = b_2/X$	$X_0 = 0.5 \left( h_0 - b_1 + \sqrt{(h_0 - b_1)^2 + 4b_2 h_0 t_0^{-c}} \right)$	$h = \frac{b_1 + X_0}{1 + (b_2/X_0)t^{-c}}$	Cieszewski (2004)	M6
Shumacher (1939) $\ln h = a + bt^{-1}$	$a = X$	$X_0 = \ln h_0 - b/t_0$	$\ln h = X_0 + b/t$	Scolforo (2006)	M7
	$b = X$	$X_0 = (\ln h_0 - a)t_0$	$\ln h = a + (X_0/t)$	Scolforo (2006)	M8
Lundqvist (1957) $h = a \exp(b - bt^{-c})$	$a = X$ $b = b_1X$	$X_0 = \ln h_0 / ((t_0 + b_1)/t_0)$	$\ln h = X_0 + X_0(b_1/t)$	Cieszewski (2004)	M9
	$a = X$	$X_0 = \frac{h_0}{\exp(b - bt_0^{-c})}$	$h = h_0 \exp(b(t_0^{-c} - t^{-c}))$	Tomé (1989)	M10
Cieszewski e Bella (1989) $h = a/1 + bt^{-c}$	$b = X$	$X_0 = \frac{-\ln(h_0/a)}{t_0^{-c}}$	$h = a(h_0/a)^{(t_0/t)^c}$	Tomé (1989)	M11
		$X_0 = 0.5(\ln h_0 + ((\ln h_0)^2 - 4b_1 t_0^{-c})^{1/2})$	$h = \exp(X_0 - (b_1/X_0)\ln(1 - \exp(-t^c)))$	Cieszewski (2004)	M12
Gompertz modificado Jarosz e Klapéc (2002) $h = a \exp(-b \exp(-ct)) + d$	$a = X$ $d = -b_1X - b_2$	$F_1 = \exp(-b \exp(-ct))$ $F_0 = \exp(-b \exp(-ct_0))$	$h = \frac{F_1(b_2 + h_0) - b_1 h_0 - b_2 F_0}{F_0 - b_1}$	Cieszewski, Zasada e Strub (2006)	M13

“Tabela 4, conclusão”

Modelo Base	Parâmetros Relacionados ao sítio	Solução Inicial para X com ( $h_0$ e $t_0$ )	Equação Dinâmica	Referência	Id
Hossfeld (1822) $h = bt^c/t^c + a$	$b = b_1 + X$ $a = a_1/X$	$R_0 = h_0 - a_1 + ((h_0 - a_1)^2 + 2h_0 \exp((b_1)/t_0^c))^{1/2}$	$h = h_0 \frac{t^c (t_0^c R_0 + \exp((b_1)))}{t^c (t^c R_0 + \exp((b_1)))}$	Cieszewski (2001)	M14
Weibull modificado Yang, Kozak e Smith (1978) $\ln h = a + b \ln(1 - \exp(-t^c))$	$a = X$ $b = b_1 + b_2 X$	$X_0 = \frac{\ln h_0 - b_1 \ln(1 - \exp(-t_0^c))}{1 + b_2 \ln(1 - \exp(-t_0^c))}$	$\ln h = X_0 + (b_1 + b_2 X_0) \ln(1 - \exp(-t^c))$	Cieszewski (2004)	M15



A estrutura dos dados utilizada para a montagem dos modelos foi composta pelos pares altura - idade para cada parcela. Nessas situações, os dados não se comportam de maneira linear, portanto, os modelos não lineares foram empregados para expressar o comportamento da altura dominante.

Para o ajuste dos modelos, foi utilizado o pacote nls da versão 3.1.2 do programa R (R CORE TEAM, 2014). Esse pacote faz o uso do algoritmo de Gauss-Newton para estimativa de mínimo quadrado dos parâmetros dos modelos.

## 2.4 Avaliação das equações dinâmicas

A avaliação da performance das equações dinâmicas para modelar o desenvolvimento da altura dominante do eucalipto foi realizado em duas fases. A primeira por meio das estatísticas descritivas, seguido das mesmas avaliações com a adição de análises gráficas, porém, em uma base de dados independente daquelas utilizadas para a calibragem dos parâmetros.

Na primeira fase, a qualidade estatística dos ajustes se deu com base na no  $R^2$  ajustado na regressão linear ( $MEF_{adj}$ ), raiz quadrada média do erro (RMSE) e média residual ( $\bar{e}$ ), em metros. As equações para calcular esses índices estão apresentadas a seguir:

$$MEF_{adj} = 1 - \frac{n - 1 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}$$

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)$$

Em que:  $p$  é o número de parâmetros da equação,  $n$  é o número de observações,  $y_i$  é a altura dominante observada e  $\hat{y}_i$  é a altura dominante predita.

Porém, a qualidade do ajuste não necessariamente reflete a qualidade da predição, portanto, na segunda fase de avaliação, as equações foram testadas em uma base de dados independente (KOZAK; KOZAK, 2003). Um total de 44 e 47 parcelas (30% do total das parcelas) foram utilizadas para a validação dos regimes de manejo de alto fuste e talhadia, respectivamente.

Para essa validação preditiva, foram calculadas as estatísticas do erro médio absoluto (MAE, %), erro médio (T, %) e índice de Willmott (D):

$$MAE (\%) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \right)}{n} \right) 100$$

$$T (\%) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)}{n} \right) 100$$

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{y}_i| + |\hat{y}_i - \bar{y}_i|)^2}$$

Em que:  $n$  é o número de observações,  $y_i$  é a altura dominante observada,  $\hat{y}_i$  é a altura dominante predita e  $\bar{y}_i$  é a média da altura dominante observada.

MAE representa uma medida do erro médio, T indica possível tendência do ajuste, ou seja, deve estar próximo de zero e D é utilizado para avaliação da acurácia do modelo. Esse índice (D) reduz o efeito de outliers e quanto mais alto o valor de D, mais eficiente é o modelo ajustado (ANGULO-MARTINEZ; BEGUERÍA, 2009). Já, a análise gráfica é essencial para a escolha do modelo mais eficiente, uma vez que as curvas podem mostrar diferenças consideráveis, mesmo quando ajustes apresentarem semelhanças estatísticas (NETER; WASSERMAN; KUTNER, 1990).

Assim, utilizou-se o comportamento dos resíduos e a geração das curvas de sitio como parte da avaliação dos ajustes das equações candidatas. Adicionalmente, a estabilidade das parcelas em cada sitio pelos modelos ajustados também foi avaliada para confirmar a veracidade das análises anteriores.

## **2.5 Expansão do parâmetro do modelo a partir da inserção de variáveis climáticas**

Segundo Scolforo et al. (2013), para uma correta interpretação e modelagem do efeito das variações climáticas sobre crescimento de um povoamento florestal, deve-se haver uma perfeita adequação espaço - temporal entre as medições do inventário florestal com as variáveis climáticas.

Em termos temporais, as variáveis climáticas foram correspondentes ao intervalo entre a primeira e a segunda medição do inventário florestal da mesma parcela e assim sucessivamente até a última medição. Em termos espaciais, as variáveis climáticas foram interpoladas para as parcelas do inventário florestal por meio do método Inverso Quadrado da Distância (IQD).

Variações climáticas estão entre os principais fatores que explicam a capacidade de crescimento das espécies florestais (WATT et al., 2014), portanto, avaliou-se possíveis aumento da performance da estimativa da altura dominante, relacionando os parâmetros dos modelos com as variáveis climáticas. Para isso, realizaram-se avaliações estatísticas de ajuste ( $MEF_{adj}$ , RMSE,  $\bar{e}$ , MAE, T e D) e análise gráfica. Essa metodologia vem sendo aplicada com sucesso na modelagem das variáveis biométricas, podendo citar os trabalhos de Ferraz Filho et al. (2011) e Scolforo et al. (2013).

Os parâmetros dos melhores modelos selecionados para cada regime de manejo foram expandidos, então, a partir da inserção das variáveis climáticas apresentadas na Tabela 3, onde buscaram-se as

variáveis/combinções que mais impactassem significativamente no desenvolvimento da variável altura dominante.

## **2.6 Cenários de produtividade a partir de variações climáticas**

A inserção de variáveis climáticas proporcionam sensibilidade fisiológica aos modelos descritivos, o que conseqüentemente permite a criação de cenários de desenvolvimento do povoamento em decorrência das flutuações interanuais do clima.

Assim, curvas de sítios foram geradas considerando três cenários plausíveis de ocorrência, sendo eles definidos como: i) pessimista, o qual foi representado pela média menos um desvio padrão em relação a variável climática de interesse; ii) regular, o qual foi definido como a média de ocorrência da variável climática de interesse nas áreas; iii) otimista, o qual foi representado pela média acrescido de um desvio padrão em relação a variável climática de interesse.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Seleção da equação dinâmica para cada regime de manejo

Foram avaliadas 15 equações dinâmicas para modelagem do desenvolvimento em altura dominante do eucalipto. Diferentemente das equações de sítio estáticas, as equações dinâmicas possuem propriedade invariante, ou seja, elas possibilitam estimar altura dominante e, conseqüentemente, o índice de sítio sem que a forma da curva seja alterada independente da idade de referência adotada (SCOLFORO, 2006). Biometristas florestais têm buscado métodos que aumentem a flexibilidade das equações de sítio, portanto, a diferença algébrica e sua posterior generalização introduzida por Cieszewski e Bailey (2000) foi considerada como importante passo para a versatilidade dos modelos.

Na Tabela 5, apresentou-se para o regime de manejo do alto fuste os parâmetros estimados para os 15 modelos, seus resultados estatísticos, além das estatísticas computadas na fase de validação.

Pela Tabela 5, observa-se que entre os cinco melhores modelos ajustados, quatro estão associados a equações polimórficas com comum assíntota (M1, M8, M11 e M12) e uma equação polimórfica com múltiplas assíntotas (M3). Todos os parâmetros apresentaram alta significância estatística ( $p < 0,0001$ ), além de apresentarem magnitude consistente e sinal apropriado para a modelagem do crescimento biológico.

Tabela 5 Parâmetros estimados, estatísticas de ajuste e estatísticas de validação dos modelos candidatos para o regime de manejo de alto fuste

Modelo	Parâmetros					Estatísticas Ajuste			Estatísticas Validação		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>b</i> <sub>1</sub>	<i>b</i> <sub>2</sub>	MEF	RMSE	$\bar{\epsilon}$	MAE %	T %	D
M1	29,076	-0,344	-	-	-	0,929	1,014	0,037	4,02%	-0,01%	0,9816
M2	-	-0,288	1,061	-	-	0,897	1,223	0,052	4,87%	0,30%	0,9751
M3	0,397	35	-10,117	-	-	0,928	1,025	0,055	4,08%	0,03%	0,9811
M4	-	4,466	-0,729	-	-	0,887	1,284	0,137	5,17%	0,78%	0,9725
M5	26,292	-	-0,697	-	-	0,917	1,1	0,066	4,39%	0,28%	0,9787
M6	-	-	3,832	0,215	-1,13	0,905	1,173	0,049	4,70%	0,25%	0,9769
M7	-	-1,679	-	-	-	0,877	1,338	0,329	5,16%	1,36%	0,9681
M8	3,486	-	-	-	-	0,92	1,08	0,152	4,29%	0,32%	0,9781
M9	-	-	-	-0,461	-	0,861	1,423	0,459	5,42%	2,12%	0,9649
M10	-	2,265	0,481	-	-	0,898	1,218	0,043	4,86%	0,26%	0,9754
M11	2,265	0,481	-	-	-	0,922	1,063	0,057	4,27%	0,00%	0,9796
M12	31,821	1,486	-	-	-	0,922	1,062	0,058	4,27%	0,02%	0,9796
M13	-	2	0,25	36	12,1	0,899	1,213	0,302	4,72%	1,14%	0,9732
M14	-	-	-	4,623	1,176	0,898	1,219	0,049	4,86%	0,28%	0,9752
M15	-	-	0,709	0,038	0,787	0,881	1,316	-0,07	5,25%	-0,30%	0,9715

Entre os modelos com os melhores índices estatísticos para o regime de manejo da talhadia estão três equações polimórficas com comum assíntota (M1, M11 e M12) e duas polimórficas com múltiplas assíntotas (M3 e M6). As estatísticas do ajuste, validação e os respectivos coeficientes das equações estão apresentados na Tabela 6. Assim como para o regime de manejo do alto fuste, todos os parâmetros foram significativos e apropriados para modelagem do crescimento biológico.



Tabela 6 Parâmetros estimados, estatísticas de ajuste e estatísticas de validação dos modelos candidatos para o regime de manejo de talhadia

Modelo	Parâmetros					Estatísticas Ajuste			Estatísticas Validação		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>b</i> <sub>1</sub>	<i>b</i> <sub>2</sub>	MEF	RMSE	$\bar{\epsilon}$	MAE %	T %	D
M1	34,309	-0,206	-	-	-	0,936	1,014	0,101	5,16%	0,20%	0,984
M2	-	-0,337	1,124	-	-	0,93	1,223	0,199	5,31%	0,85%	0,982
M3	0,309	10,453	-2,768	-	-	0,937	1,024	0,143	5,15%	0,33%	0,984
M4	-	4,736	-0,784	-	-	0,922	1,284	0,272	5,41%	1,30%	0,98
M5	28,139	-0,606	-	-	-	0,921	1,1	0,116	5,60%	0,52%	0,98
M6	-	-	0,332	0,099	3,709	0,933	1,171	0,174	5,24%	0,66%	0,983
M7	-	-1,538	-	-	-	0,918	1,338	0,514	5,72%	2,14%	0,978
M8	3,4	-	-	-	-	0,921	1,08	0,388	5,74%	0,99%	0,977
M9	-	-	-	-0,45	-	0,913	1,423	0,567	5,93%	2,57%	0,977
M10	-	2,04	0,556	-	-	0,93	1,218	0,196	5,37%	0,83%	0,983
M11	39,671	0,54	-	-	-	0,937	1,063	0,14	5,21%	0,31%	0,984
M12	37,72	1,199	-	-	-	0,937	1,062	0,132	5,16%	0,31%	0,984
M13		2	0,11	34	12,5	0,931	1,211	-0,152	5,54%	-1,25%	0,982
M14	-	-	-	4,088	1,241	0,93	1,219	0,199	5,32%	0,84%	0,983
M15	-	-	0,407	-0,005	1,105	0,751	1,315	-0,02	5,45%	-0,28%	0,983

Para os dois regimes de manejo estudados, foi possível observar que os modelos polimórfico com comum assíntota (M1) e polimórfico com múltiplas assíntotas (M3) apresentaram resultados semelhantes, porém sempre com o modelo M1 mostrando-se ligeiramente superior para ambos os regimes de manejo.

Como mostrado nas Tabelas 5 e 6, os modelos polimórficos foram superiores aos modelos anamórficos, indicando que o desenvolvimento em altura dominante para o eucalipto, nessa região, apresenta polimorfismo evidente.

Tanto para o regime de manejo do alto fuste quanto para o de talhadia, os modelos provenientes da equação de Von-Bertalanffy Richards modificado M1 e M3 apresentaram índices estatísticos superiores aos demais. Isso comprova a grande aplicabilidade desse modelo para representar o comportamento sigmoidal de desenvolvimento biológico, tal como mostrado no trabalho de Scolforo et al. (2013). Diferentemente das outras funções de crescimento biológico, representadas pelos modelos monomolecular, logístico e Gompertz, a equação de Von-Bertalanffy Richards modificado não apresenta ponto de inflexão fixo, o que contribui para maior flexibilidade dessa função.

Apesar do modelo M1 ter sido ligeiramente superior ao modelo M3 tanto nas estatísticas de ajuste, quanto nas estatísticas de validação cruzada para ambos os regimes de manejo, torna-se importante à análise gráfica dos resíduos para a definição do modelo mais eficiente, conforme discutido anteriormente.

Na Figura 2, apresenta-se o comportamento dos resíduos em função dos valores preditos da altura dominante para os modelos M1 e

M3 em relação à base de validação cruzada para o regime de manejo do alto fuste. Os dois modelos se apresentaram semelhantes com relação à distribuição dos resíduos, sendo importante notar que não houve nenhuma tendência no comportamento deles, conforme observado na Figura 2.

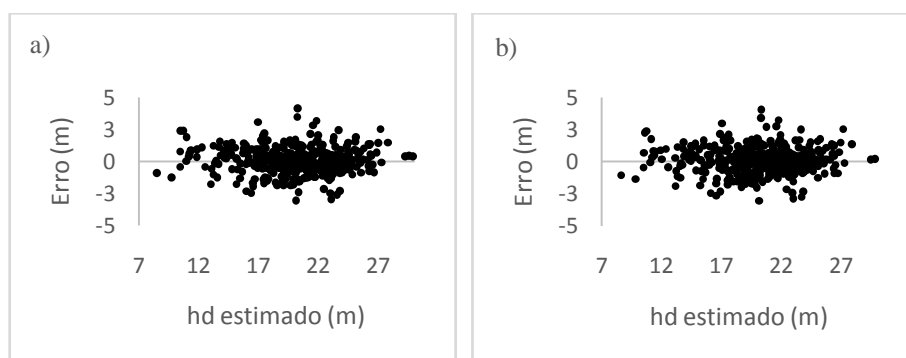


Figura 2 Distribuição dos resíduos em relação aos valores preditos para os modelos M1 (a) e M3 (b) no regime de manejo do alto fuste

De forma a se comprovar a não existência tendência para os modelos, na Figura 3, apresenta-se o comportamento dos resíduos em termos médios e absolutos em função das classes de idade. Novamente percebe-se a semelhança entre os ajustes podendo destacar as maiores diferenças entre a altura dominante observada e estimada nas classes com menos observações, conforme esperado. Sendo assim, confirma-se como verdadeira a ligeira superioridade do modelo M1 para expressar o desenvolvimento da altura dominante para o regime de manejo do alto fuste.

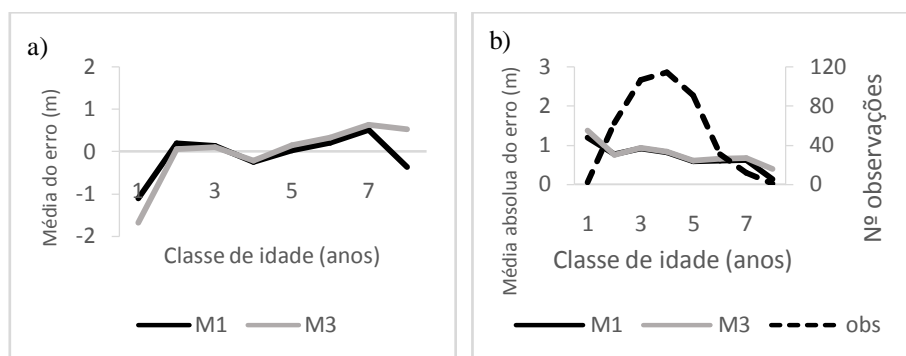


Figura 3 Resíduos em termos médios (a) e absolutos (b) da projeção em altura dominante em função das classes de idade para o regime de manejo do alto fuste

Na Figura 4, apresentam-se as avaliações gráficas para o regime de manejo de talhadia, onde novamente os modelos M1 e M3, não apresentaram nenhuma tendência no comportamento.

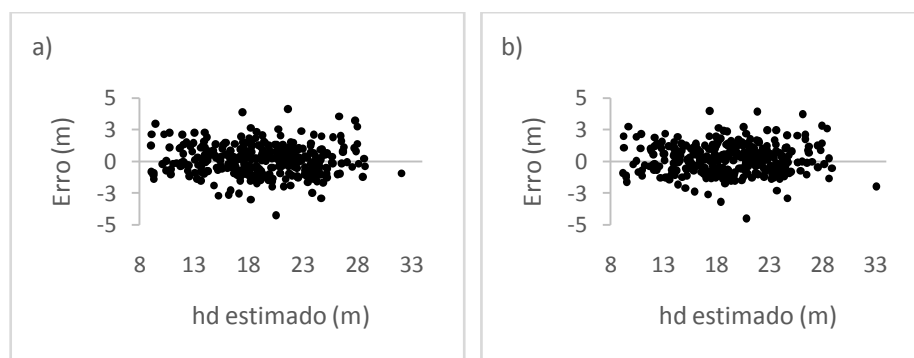


Figura 4 Distribuição dos resíduos em relação aos valores preditos para os modelos M1 (a) e M3 (b) no regime de manejo da talhadia

Assim como para o regime de alto fuste, no regime de manejo da talhadia os modelos M1 e M3 apresentaram desempenho semelhante entre as classes de idade. Novamente, as maiores diferenças foram observadas

nas classes com menos observações, como mostrado na Figura 5. Sendo assim, confirma-se novamente como verdadeira a ligeira superioridade do modelo M1, para expressar o desenvolvimento da altura dominante também para o regime de manejo da talhadia.

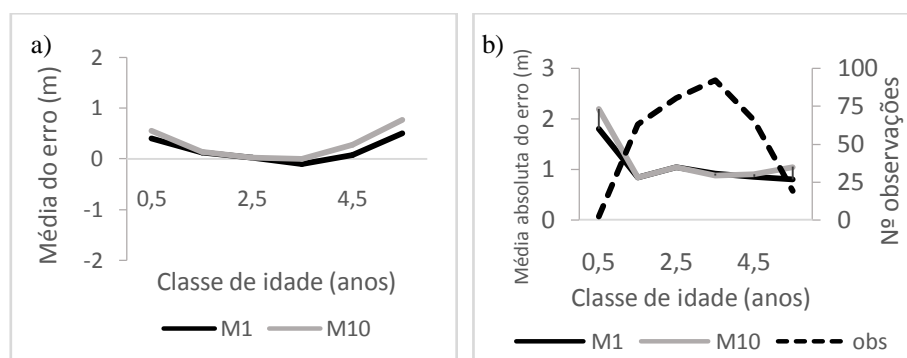


Figura 5 Resíduos em termos médios (a) e absolutos (b) da projeção em altura dominante em função das classes de idade para o regime de manejo da talhadia

Como última análise gráfica, curvas de sítio foram geradas considerando a idade de 7 anos como referência. Essa última análise foi realizada para se verificar, de fato, se o modelo M1 foi superior ao M3, tendo em vista a semelhança na qualidade de ajuste de ambos e também pelo fato do modelo M3 apresentar a propriedade de múltiplas assíntotas, diferentemente do modelo M1 que apresenta comum assíntota. Essa análise foi realizada, pois como o desenvolvimento do eucalipto é acelerado, o encontro da assíntota num ponto cedo no tempo pode se tornar um problema com relação ao uso do modelo M1.

Para isso, uma nova calibragem dos parâmetros foi realizada para cada regime de manejo com a utilização da base total proveniente do IFC.

Na Figura 6, apresentam-se as curvas geradas pelos modelos M1 e M3, onde percebe-se a semelhança de desenvolvimento da altura dominante em função do tempo para o regime de manejo do alto fuste por ambos os modelos ajustados. Observa-se, para esse regime de manejo que, embora o modelo M3 possua a propriedade de múltiplas assíntotas (KITIKIDOU; KAYMAKIS; MILIOS, 2012), ele apresentou curvas similares as do modelo M1, o qual apresentou encontro assintótico somente aos 40 anos, ou seja, muito além do que costuma ser definido como a idade de referência para o eucalipto. Esse encontro assintótico tardio apresentado pelo modelo M1 indica que para essas áreas de eucalipto no regime de manejo do alto fuste não há possibilidade de enviesamento de estimativas

Adicionalmente, o modelo M1 apresentou maior estabilidade, pois, 78% das parcelas não mudaram de classe, 18% apresentaram uma mudança e 3% duas mudanças. Já, o modelo M3, 72% das parcelas não sofreram mudanças de classes, 18% apenas uma mudança e 11% com duas ou mais mudanças. Assim, reforça a escolha do modelo M1 para esse regime de manejo como o mais apropriado, além de, nesse caso, ele apresentar a vantagem pela simplificação de interpretação.

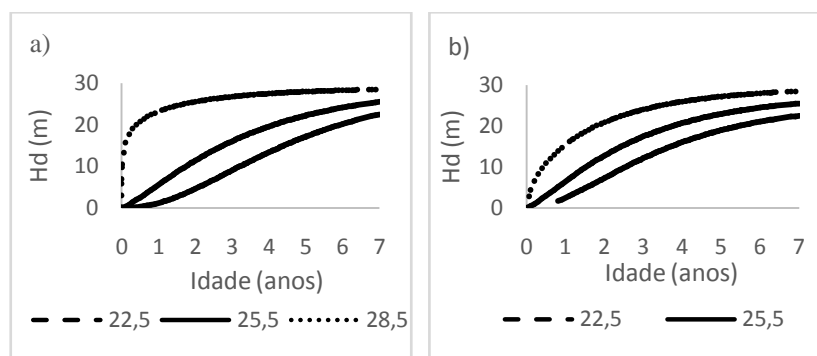


Figura 6 Curvas de índices de sítios com idade de referência de 7 anos para os modelos M1 (a) e M3 (b) no regime de manejo de alto fuste

Seguindo a mesma lógica do regime de manejo do alto fuste, na Figura 7, apresentaram-se as curvas de sítio para o regime de manejo da talhadia, considerando os modelos M1 e M3. Vale aqui ressaltar a diferença do valor assintótico entre os regimes de manejo de alto fuste e talhadia, o que indica a existência de um menor número de observações nas maiores classes de idade para o regime de manejo da talhadia (conforme Tabelas 1 e 2), porém nada que afete a qualidade dos resultados. Os modelos M3 e M1 novamente apresentaram curvas semelhantes para esse regime de manejo. Adicionalmente, o modelo M1 apresentou encontro assintótico somente aos 60 anos, ou seja, novamente muito além da idade adotada como de referência para o eucalipto.

Novamente, o modelo M1 apresentou maior estabilidade, onde 81% das parcelas não apresentaram mudança de classe, 14% uma alteração e em apenas 5% foram observadas mais de uma mudança. Já, o modelo M3, 71% das parcelas não mudaram de classe, 21% uma alteração e 8% mais de uma mudança. Assim, o modelo M1 foi

selecionado para representar a capacidade produtiva dos locais para o regime de talhadia.

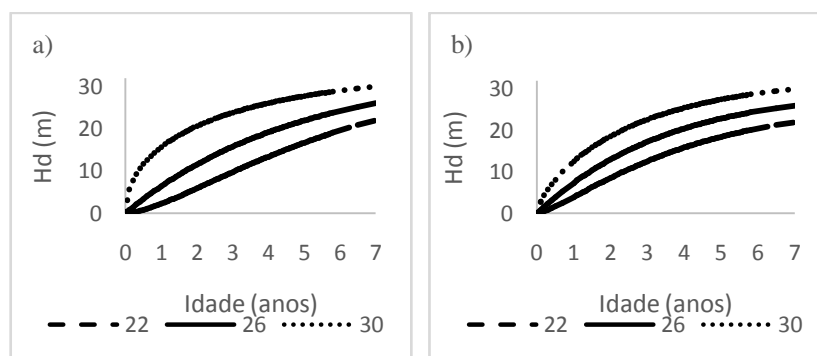


Figura 7 Curvas de índices de sítios com idade de referência de 7 anos para os modelos M1(a) e M3 (b) no regime de manejo da talhadia

Vale ressaltar que os regimes de manejo de alto fuste e talhadia influenciam, diretamente, sobre o crescimento em altura dominante do eucalipto, por isso, é importante avaliar as curvas de sítios para os dois manejos separadamente, como feitos neste trabalho.

Os trabalhos de Dieguez-Aranda et al. (2005), Ercanli, Kahrman e Yavuz (2014) e Rodríguez-Carrillo et al. (2015) relataram superioridade das equações polimórficas com múltiplas assíntotas para descrever o comportamento da altura dominante em comparação às equações anamórficas e polimórficas com comum inflexão e assíntota, respectivamente. O modelo polimórfico M3, apresenta dois parâmetros ( $a;c$ ) variando com as condições do sitio, ao passo que o modelo polimórfico M1, apresenta apenas o parâmetro ( $c$ ) em função do sítio. Entretanto, neste estudo, o modelo M1 apresentou uma ligeira



superioridade nas estatísticas do ajuste e validação das equações em relação ao M3 (Tabelas 3 e 4). Além disso, as análises gráficas reforçaram esse modelo M1 como o mais adequado para representar o desenvolvimento da variável altura dominante para ambos os regimes de manejo estudados. Como apresentado no estudo de Cieszewski, Strub e Zasada (2007), a adoção de múltiplas assíntotas se justifica quando estas se cruzam muito cedo, porém, este não foi o caso das curvas polimórficas com comum assíntotas desse estudo. Diante das análises feitas até aqui, o modelo M1 foi o indicado para a sequência das avaliações tanto para o regime de manejo do alto fuste quanto para o regime de manejo da talhadia.

### **3.2 Condicionamento dos parâmetros a partir de variáveis climáticas nos modelos selecionados para cada regime de manejo**

Foi investigado o aumento da capacidade preditiva dos modelos M1 ajustados para cada regime de manejo, a partir da expansão dos parâmetros dos modelos em função de variáveis climáticas. Para isso, testou-se para cada regime de manejo quais variáveis climáticas apresentaram uma maior significância quanto ao desenvolvimento da variável altura dominante.

Verificou-se que a variável precipitação foi a de maior impacto no desenvolvimento da variável altura dominante para ambos os regimes de manejo, ou seja, ela tem um maior impacto na determinação da capacidade produtiva local. Porém, enquanto para o regime de manejo do alto fuste a média de precipitação mensal foi quem melhor apresentou

significância quanto ao desenvolvimento da altura dominante, para o regime de manejo da talhadia foi essa mesma variável adicionada da distribuição do total precipitado ao longo do ano. Esse acréscimo da distribuição do total precipitado, ao longo do ano, para o regime de manejo da talhadia faz sentido, tendo em vista que por este ser um regime de manejo de condução por si só já apresenta uma queda de produtividade em relação ao regime de manejo de alto fuste e, sendo assim, qualquer irregularidade no período chuvoso, ou período de estiagem acaba por impactar mais na capacidade do local em produzir madeira (MIRANDA et al., 2015).

As demais variáveis climáticas, por mais que tenham impacto no desenvolvimento da variável altura dominante, tem um impacto muito reduzido quando comparado ao efeito da precipitação, conforme já observado por Stape, Binkley e Ryan (2004) para uma região similar. Com exceção da precipitação, as demais variáveis apesar de também apresentarem um gradiente de mudança da Bahia para o Espírito Santo, apresentam esse gradiente de uma forma mais suave, o que decisivamente acaba por explicar em menor quantidade a variação do desenvolvimento em altura dominante. Esse gradiente mais acentuado de variação em precipitação pode ser observado no estudo de Alvares et al. (2013).

Reforçando isso, observou-se que para o regime de manejo do alto fuste, a variável precipitação correspondeu a 60% da variação do incremento em altura dominante, ao passo em que, para o regime de manejo da talhadia, essa mesma variável, acrescida da distribuição do total precipitado, correspondeu a 65% da variação do incremento em altura dominante.

Sendo assim, pode se observar o quanto a precipitação impacta no desenvolvimento de altura dominante, ou seja, por mais que as outras variáveis climáticas tenham efeito no desenvolvimento da altura dominante, a maior parte da variação do desenvolvimento dessa variável está associada à precipitação. Consequentemente, há um indício que apenas o seu uso se torna adequado, além de resultar em uma simplificação da interpretação dos resultados.

A partir da definição dessas variáveis, o passo seguinte consistiu na verificação de onde a inserção dessas variáveis no modelo faria mais sentido do ponto de vista biológico e estatístico. Diante disso, testou-se a expansão do parâmetro que representa a assíntota ( $a$ ), denominado de modelo M1\_A e também do parâmetro relacionado à inclinação ( $b$ ), chamado de M1\_B. Assim, a expansão proposta para cada parâmetro no regime de manejo do alto fuste foi:

$$\text{M1\_A} \quad a = c_0 + c_1 * Mppt$$

$$\text{M1\_B} \quad b = c_0 + c_1 * Mppt$$

Em que:  $a$  e  $b$  são os parâmetros a serem estimados,  $c_0$ ,  $c_1$  representam os coeficientes da regressão e  $Mppt$  média da precipitação mensal.

A expansão proposta para cada parâmetro no regime de manejo da talhadia foi:

$$\text{M1\_A} \quad a = c_0 + c_1 * Mppt + c_2 * Sdiaschuva$$

$$\text{M1\_B} \quad b = c_0 + c_1 * Mppt + c_2 * Sdiaschuva$$

Em que:  $a$  e  $b$  parâmetros a serem estimados,  $c_0$ ,  $c_1$  e  $c_2$  coeficientes da regressão,  $Mppt$  média da precipitação mensal,  $Sdiaschuva$  distribuição do total precipitado ao longo do ano.

Na Tabela 7, mostram-se os parâmetros resultantes das versões expandidas dos modelos M1, bem como as respectivas estatísticas de precisão para o regime de manejo do alto fuste. Os parâmetros foram significativos e apropriados para a modelagem do crescimento biológico.

Tabela 7 Coeficientes do modelo M1 com parâmetros expandidos em função das variáveis climáticas e estatísticas do ajuste para o regime de manejo do alto fuste

Modelo	Parâmetros					Estatísticas Ajuste					
	$a$	$b$	$c_0$	$c_1$	$c_2$	MEF	RMSE	$\bar{e}$	MAE %	T %	D
M1	29,004	-0,34	-	-	-	0,945	1,046	0,051	5,89%	0,06%	0,9797
M1_A	-	-0,33	22,922	0,056	-	0,952	0,978	0,055	5,50%	0,10%	0,9823
M1_B	29,461	-	-0,074	-0,002	-	0,954	0,966	0,046	5,44%	0,05%	0,9827

A inclusão da variável média da precipitação mensal aumentou em 7% a eficiência do modelo M1 para o regime de manejo do alto fuste, sendo importante destacar que a melhor performance foi em relação ao parâmetro da inclinação (*b*). O condicionamento do parâmetro da inclinação à expansão a partir de modificadores climáticos também foram aplicados com sucesso nos trabalhos de Ferraz-Filho et al. (2011) e Lopez-Senespleda et al. (2014), sendo importante destacar a correlação do crescimento acentuado em função das condições climáticas sobre o povoamento (JONES, 2013).

O modelo M1, ajustado de forma tradicional e esse mesmo modelo acrescido da variável climática média da precipitação mensal, no parâmetro da inclinação (M1\_B), comportaram-se de maneira semelhante entre as classes de idade, porém com ligeira superioridade para o modelo M1\_B, o que credencia esse modelo ajustado como o de melhor performance (Figura 8).

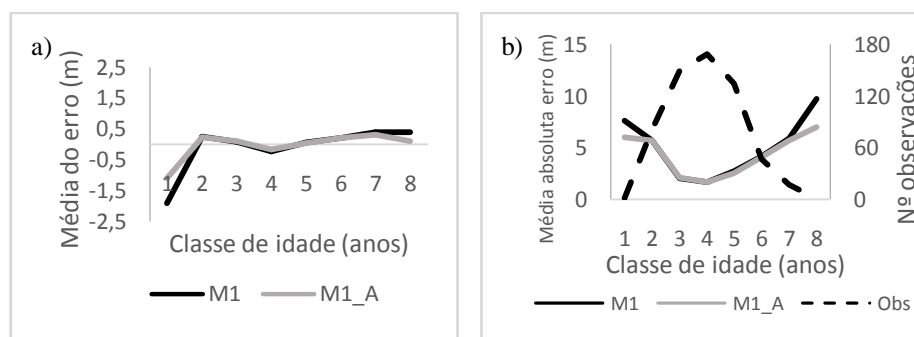


Figura 8 Resíduos em termos médios (a) e absolutos (b) da projeção da altura dominante pelo ajuste tradicional (M1) e por este modelo expandido com o acréscimo da variável media da precipitação mensal (M1\_B) para o regime de manejo do alto fuste

Para o regime de manejo da talhadia, o modelo M1 foi expandido com o acréscimo da variável média da precipitação mensal e da distribuição do total precipitado ao longo do ano. Observa-se, pela Tabela 8, que novamente a expansão dos parâmetros com essas duas variáveis foi estatisticamente significativa (Tabela 8).

Tabela 8 Coeficientes do modelo M1 com parâmetros expandidos em função das variáveis climáticas e estatísticas do ajuste para o regime de manejo da talhadia

Modelo	Parâmetros					Estatísticas Ajuste					
	$b_0$	$b_1$	$c_0$	$c_1$	$c_2$	MEF	RMSE	$\bar{e}$	MAE %	T %	D
M1	33,953	-0,206	-	-	-	0,96	1,193	0,088	5,18%	0,11%	0,983
M1_A	-	-0,219	24,039	0,102	-0,013	0,967	1,112	0,038	4,76%	0,07%	0,986
M1_B	33,81	-	-0,052	-0,002	2,39E-04	0,966	1,115	0,033	4,81%	-0,17%	0,986



Assim como para o regime de manejo do alto fuste, o modelo M1 acrescido de variáveis climáticas (media da precipitação mensal e distribuição do total precipitado ao longo do ano) aumentou em 7% a eficiência da estimativa, como também mostrado por Gonzáles-García et al. (2015), sendo o melhor resultado para esse regime de manejo apresentado com a expansão do parâmetro relacionado à assíntota  $a$ , sendo este um resultado semelhante ao encontrado por Scolforo et al. (2013). Ressalta-se aqui a importância de se realizar os testes nos dois parâmetros ( $a$  e  $b$ ), pois, o modelo de Von-Bertalanfy Richards modificado, por ser biomatemático permite a representação de forma consistente da expansão paramétrica na sua assíntota ou inclinação, ficando a critério do pesquisador observar onde essa expansão apresenta maior impacto.

Na Figura 9, apresentam-se os erros acumulados pelo modelo M1 ajustado de forma tradicional e o modelo M1\_A expandido na assíntota com as variáveis media de precipitação mensal e distribuição do total precipitado ao longo do ano em relação às classes de idade dos plantios de eucalipto. Percebe-se, por esta Figura 9, o modelo M1\_A com performance superior ao modelo M1.

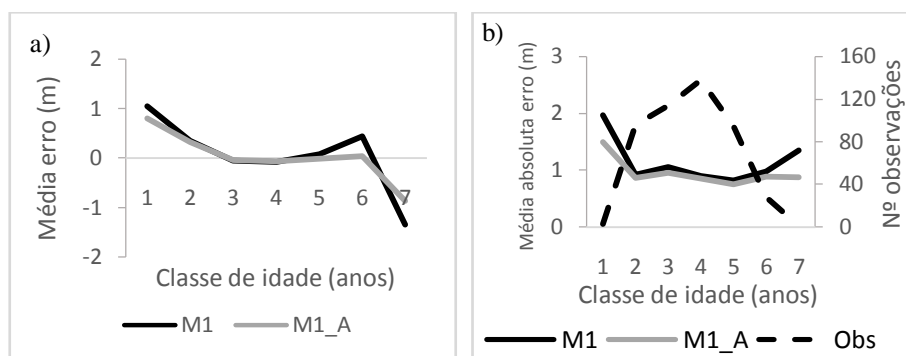


Figura 9 Resíduos em termos médios (a) e absolutos (b) da projeção da altura dominante pelo ajuste tradicional (M1) e por este modelo expandido com o acréscimo da variável media da precipitação mensal e distribuição do total precipitado ao longo do ano (M1\_A) para o regime de manejo da talhadia

Comparando a habilidade preditiva do modelo M1, constatou-se que a expansão dos parâmetros com variáveis climáticas resultou no aumento da performance de ambos regimes de manejo, sem descaracterizar o comportamento biológico do crescimento. Como esperado, a precipitação foi a variável com maior representatividade no crescimento do eucalipto, uma vez que a média da precipitação foi selecionada para explicar a variação nos parâmetros de ambos regimes de manejo. Além dela, a distribuição do total precipitado ao longo do ano também foi utilizada para expandir o parâmetro assintótico do modelo M1 para o regime de manejo da talhadia. A utilização de variáveis climáticas são fatores importantes para o crescimento de espécies florestais, sendo observado que os estudos de Bravo-Oviedo et al. (2008) e Nunes et al. (2011) também a partir do relacionamento das variáveis climáticas com os parâmetros das equações dinâmicas mostraram aumento na performance dos modelos.

### **3.3 Criação de cenários de variações climáticas interanuais com os modelos condicionados a inserção de variáveis climáticas**

Os modelos descritivos acrescidos com variáveis climáticas podem desempenhar um papel importante na avaliação dos efeitos das alterações climáticas sobre o crescimento florestal, sendo esse fato mencionado por Scolforo et al. (2013).

A expansão dos parâmetros do modelo de Von-Bertallanfy Richards modificado acarretou um aumento de precisão para os dois regimes de manejo estudados. Porém, muito além desse ligeiro aumento em performance dos modelos ajustados, a inclusão de variáveis climáticas acarreta na possibilidade de se criar cenários, ou seja, observar como as variações climáticas interanuais podem afetar na capacidade produtiva local em produzir madeira. Para espécies como o *Pinus* ou *Douglas Fir*, oscilações interanuais climáticas não apresentam grande impacto na classificação de sítio, pois essas espécies, por apresentarem longas rotações, acabam não sendo tão sensíveis a curtas variações climáticas, pois mesmo reduzindo seu crescimento em períodos mais secos, elas apresentam possibilidade de recuperação do seu crescimento nos anos seguintes. Já, a eucaliptocultura, conforme apresentado e discutido por Almeida et al. (2004), por apresentar um crescimento em ritmo acelerado no Brasil, acaba sendo muito sensível quanto ao seu crescimento por variações climáticas, ou seja, um período mais seco ou chuvoso em relação ao normal em um dos anos de sua rotação, pode afetar drasticamente sua produtividade final.

Dessa forma, o condicionamento de parâmetros do modelo ajustado M1, para os dois regimes de manejo estudados, visam a observar a resposta do crescimento florestal sob possíveis condições climáticas de ocorrência, em razão das variações interanuais que vêm sendo observadas no Brasil, mais especificamente para os estados do Espírito Santo e Bahia nos últimos anos.

Sendo assim, nas Figuras 10 e 11, evidenciou-se a flexibilidade, importante para quando se necessita planejar recursos futuros esperados pelas florestas de eucalipto, desses modelos ajustados condicionados à inclusão da variável precipitação.

Para o regime de alto fuste, o modelo foi expandido considerando a média da precipitação mensal, e, sendo assim, esse modelo foi atualizado para a criação de cenários, a partir da variação dessa variável climática. Os cenários testados foram: i) pessimista, o qual foi considerado uma precipitação média mensal de 27,4 mm (822 mm anual); ii) regular, o qual foi considerado uma precipitação média mensal de 45,2 mm (1357 mm anual); iii) otimista, o qual foi considerado uma precipitação média mensal de 63,1 mm (1893 mm anual).

Na Figura 10 e na Tabela 9, corroboram as afirmações feitas por Almeida et al. (2004) e Stape, Binkley e Ryan (2004), onde os autores observaram forte correlação existente entre o total precipitado na área com o desenvolvimento em altura dominante da floresta. Nota-se maior variação na classe menos produtiva (22,5 m), ou seja, piores sítios sofrem maior impacto, em razão das oscilações climáticas, ou seja, anos atípicos podem acarretar em grandes diferenças na expectativa do crescimento para esses sítios se não contemplado na modelagem do desenvolvimento

da altura dominante a variável precipitação. Adicionalmente, observa-se que as áreas mais produtivas (27,5 m) são menos sensíveis às variações climáticas, fato este explicado por esses locais ao menos no tempo atual possuírem uma maior disponibilidade de recursos para o desenvolvimento das plantas.

Pela Tabela 9, observa-se que o uso do modelo descritivo sem variável climática (Tradicional) apresenta grande proximidade de estimativa em relação ao modelo com expansão de parâmetro pela variável média da precipitação mensal, para o cenário regular nas três classes de sítio. Este é um indicativo que demonstra a confiabilidade do modelo expandido com variáveis climáticas, ou seja, além dele apresentar uma melhor performance em termos preditivos, esse resultado comprova que a expansão paramétrica não alterou a característica biológica do modelo original.

Tabela 9 Impacto dos cenários climáticos no índice de sítio para o regime de manejo do alto fuste.

	Classe Sítio III (21,5 m)				Classe Sítio II (24,5 m)				Classe Sítio I (27,5 m)			
	Pessimista	Regular	Otimista	Tradicional	Pessimista	Regular	Otimista	Tradicional	Pessimista	Regular	Otimista	Tradicional
SI <sub>7</sub>	15,3	20,9	24,5	21,5	20,4	24,3	26,6	24,5	26,3	27,7	28,5	27,5
Variacão	72%	97%	114%	100%	83%	99%	109%	100%	95%	101%	104%	100%

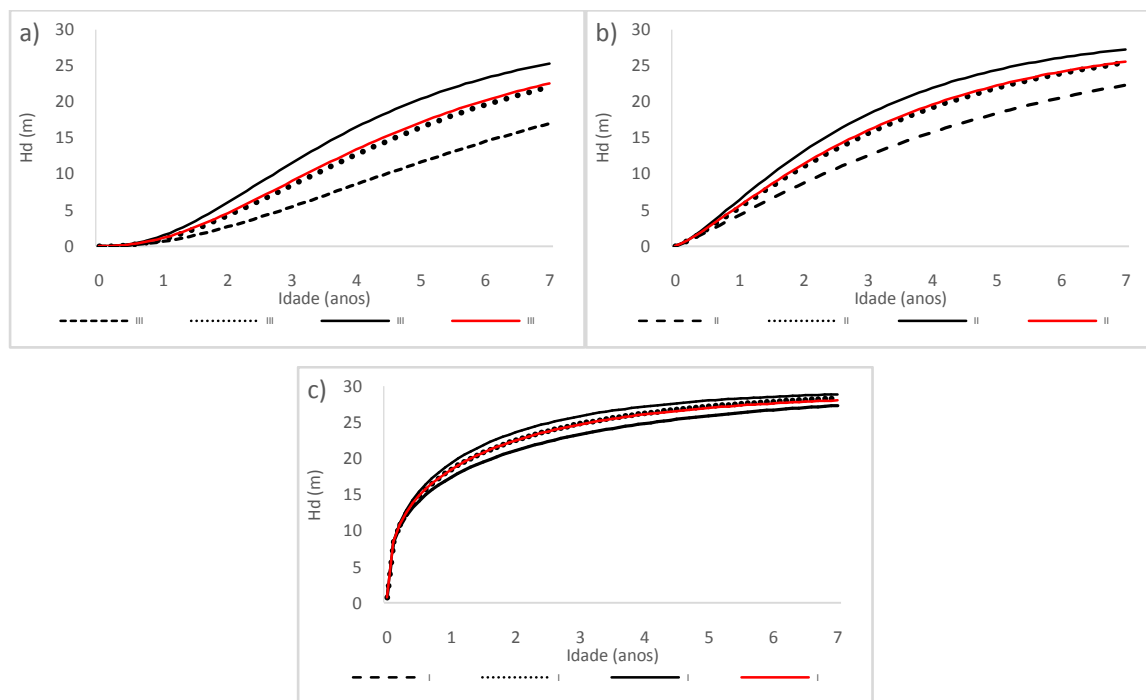


Figura 10 Curvas de sítios geradas considerando os três cenários climáticos para o regime de manejo do alto fuste para os sítios III (a), II (b) e I (c)

Assim como para o regime de manejo de alto fuste, foi analisado o comportamento do desenvolvimento em altura dominante para o regime de manejo da talhadia em função dos cenários climáticos. Os cenários foram construídos seguindo a mesma lógica, porém, para esse regime de manejo, as variáveis selecionadas foram a média da precipitação mensal e a distribuição da precipitação ao longo do ano. Assim, os cenários testados foram: i) pessimista, o qual foi considerado uma precipitação média mensal de 29,1 mm (873 mm anual) distribuídos em 136 dias de chuva no ano; ii) regular, o qual foi considerado uma precipitação média mensal de 45,7 mm (1370 mm anual) distribuídos em 165 dias de chuva no ano; iii) otimista, o qual foi considerado uma precipitação média mensal de 62,3 mm (1867 mm anual) distribuídos em 195 dias (Figura 11).

Essa combinação apresenta a vantagem de relacionar a quantidade com a distribuição da chuva no ano. Novamente, foi possível notar forte resposta do desenvolvimento da altura dominante com a quantidade e a distribuição do total precipitado sobre o povoamento (Figura 12).

Na Tabela 10 e na Figura 11 apresentou-se o impacto das flutuações climáticas no índice de sítio local para o regime de manejo de talhadia. Diferentemente do regime do alto fuste, a classe de sítio mais produtiva no regime de manejo da talhadia sofreu um maior impacto em relação às variações climáticas.



Tabela 10 Impacto dos cenários climáticos no índice de sítio para o regime de manejo da talhadia

	Classe Sítio III (21,0 m)				Classe Sítio II (24,0 m)				Classe Sítio I (27,0 m)			
	Pessimista	Regular	Otimista	Tradicional	Pessimista	Regular	Otimista	Tradicional	Pessimista	Regular	Otimista	Tradicional
SI <sub>7</sub>	19,2	21,5	23,8	21,0	21,7	24,3	26,9	24,0	24,2	27,1	30,0	27,0
Variacão	90%	102%	113%	100%	90%	101%	112%	100%	90%	100%	111%	100%

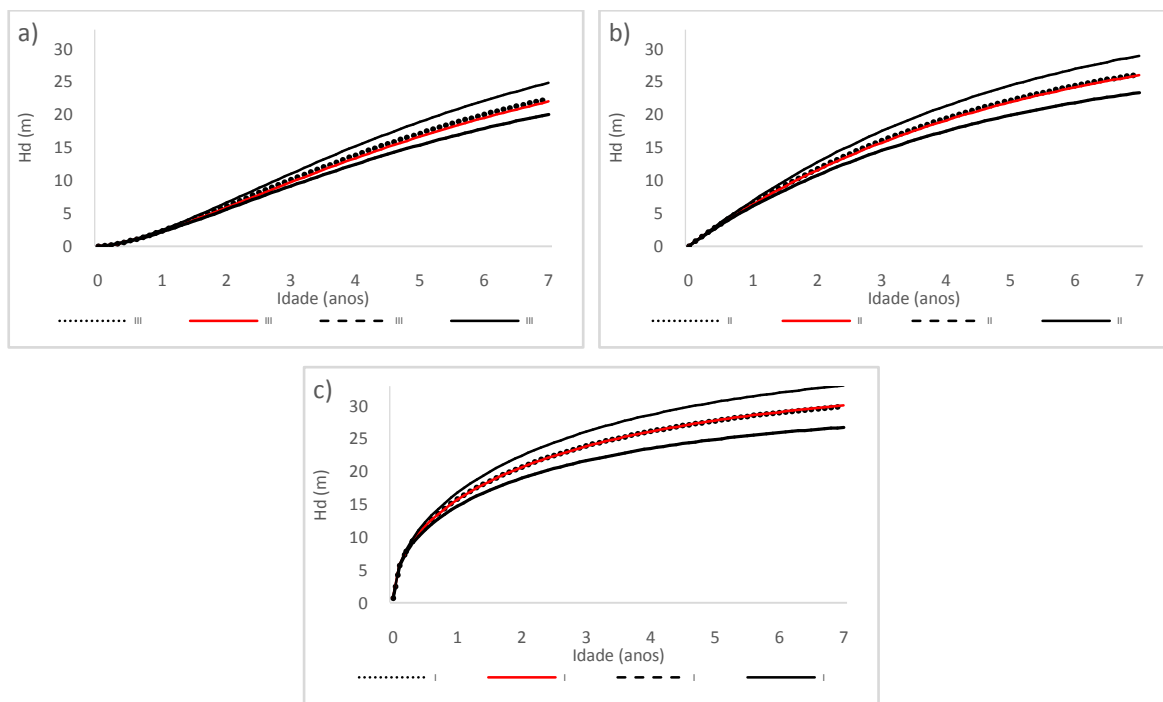


Figura 11 Curvas de sítios geradas considerando os três cenários climáticos para o regime de manejo da talhadia para os sítios III (a), II (b) e I (c)

Os resultados apresentados demonstraram que os modelos propostos com variáveis climáticas para cada regime de manejo são capazes de atualizar a capacidade de produção madeireira local, fator este que contribui para um planejamento mais adequado do empreendimento para a eucaliptocultura.

Testes adicionais para possíveis novos cenários que irão ocorrer nos próximos anos servirão de base para se reforçar as vantagens do uso dessa metodologia como uma forma de se flexibilizar os modelos matemáticos para possíveis variações climáticas interanuais que tanto afetam a produção da eucaliptocultura.

## 4 CONCLUSÃO

O modelo de Von-Bertalanfy Richards modificado polimórfico com comum assíntota foi determinado como o mais acurado para prever o desenvolvimento da variável altura dominante com a consequente classificação da capacidade produtiva das áreas para os regimes de manejo de alto fuste e talhadia.

Este estudo indicou que a performance dos modelos de predição do desenvolvimento da altura dominante pode ser potencializada expandindo-se os parâmetros em função das condições climáticas. O modelo biomatemático de Von-Bertalanfy Richards modificado com inclusão da variável climática precipitação não perdeu sua propriedade biológica, ao mesmo tempo em que a inserção do componente climático, neste modelo, propiciou ao mesmo uma flexibilidade para a atualização de acordo com variações climáticas interanuais.

Essa metodologia apresenta potencial para a área florestal brasileira, pois, permite aos gestores respostas diferentes do crescimento biológico em decorrência de variações climáticas, considerando o mesmo material genético e sob as mesmas condições de manejo.

**ARTICLE 1 MODELING OF DOMINANT HEIGHT GROWTH OF  
EUCALYPTUS PLANTATIONS WITH PARAMETERS  
CONDITIONED TO CLIMATE VARIATIONS**

**Abstract:** The purpose of this study was to propose a flexible and accurate method to figure the productive capacity of forest stands of *Eucalyptus urograndis*. We used the algebraic difference method to test 15 equations for modeling the dominant height growth. Models were adjusted to a dataset from permanent plots containing clonal plantations of eucalyptus located in Bahia and Espírito Santo. The database was analyzed separately for the high tree-trunk and coppice management regimes. The best model adjusted to each management regime was based in adjustment, validation and graphical analysis statistical criteria. The best model parameter was expanded with the addition of climate variables, which enabled the scenarios creation. The polymorphic modified Von-Bertallanfy Richards model with common asymptote showed the best performance for the management regimes. Regarding the high tree-trunk management, we found the highest performance for the conditioning of the parameter related with inclination by the mean of monthly rainfall. For the coppice management regime, the parameter relating to asymptote, conditioned by the mean rainfall and its distribution throughout the year, provided the best performance. These findings enabled biological flexibility to models due to interannual variations in precipitation. Expressions of parameters, however, did not mischaracterize the pattern of the modified Von-Bertallanfy Richards model for the management models under study. The climatic conditioning of inclination and asymptote parameters for both two management regimes brought gains in terms of accuracy of estimates. In addition, it allowed the generation of productivity scenarios from the amount and distribution of total rainfall in areas under study.

**Key-words:** Precipitation. High tree-trunk. Coppice.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. C. et al. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1, p. 167-177, 2004.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANGULO-MARTÍNEZ, M.; BEGUERÍA, S. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: a comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 379, n. 1, p. 111-121, 2009.

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**: studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands. Oxford: Pergamon, 1970. 520 p.

BAILEY, R. L.; CLUTTER, J. L. Base-age invariant polymorphic site curves. **Forest Science**, Bethesda, v. 20, n. 2, p. 155-159, 1974.

BRAVO-OVIEDO, A. et al. Dominant height growth equations including site attributes in the generalized algebraic difference approach. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 38, n. 9, p. 2348-2358, 2008.

CIESZEWSKI, C. J. **GADA derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes from Richards, Weibull, and other exponential functions**. Georgia: University of Georgia, 2004. 16 p. (PMRC-TR, 5).

CIESZEWSKI, C. J. Three methods of deriving advanced dynamic site equations demonstrated on inland Douglas-fir site curves. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 31, n. 1, p. 165-173, 2001.

CIESZEWSKI, C. J.; BELLA, I. E. Polymorphic height and site index curves for lodgepole pine in Alberta. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 19, n. 9, p. 1151-1160, 1989.

CIESZEWSKI, C. J.; STRUB, M. Generalized algebraic difference approach derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes from exponential and logarithmic functions. **Forest Science**, Bethesda, v. 54, n. 3, p. 303-315, 2008.

CIESZEWSKI, C. J.; STRUB, M.; ZASADA, M. New dynamic site equation that fits best the Schwappach data for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Central Europe. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 243, n. 1, p. 83-93, 2007.

CIESZEWSKI, C. J.; ZASADA, M.; STRUB, M. Analysis of different base models and methods of site model derivation for Scots pine. **Forest Science**, Bethesda, v. 52, n. 2, p. 187-197, 2006.

CIESZEWSKI, J.; BAILEY, L. Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. **Forest Science**, Bethesda, v. 46, n. 1, p. 116-126, 2000.

CIRILLO, B. Lucro na floresta. **Globo Rural**, São Paulo, n. 357, p. 31-37, jul. 2015.

COCHRAN, W. G. **Sampling techniques**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Wiley, 1977. 555 p.

DÍAZ-MAROTO, I. J. et al. Site index model for natural stands of rebollo oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) in Galicia, NW Iberian Peninsula. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 57-68, 2010.

DIÉGUEZ-ARANDA, U. et al. Site quality equations for *Pinus sylvestris* L. plantations in Galicia (northwestern Spain). **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 62, n. 2, p. 143-152, 2005.

ERCANLI, I.; KAHRİMAN, A.; YAVUZ, H. Dynamic base-age invariant site index models based on generalized algebraic difference approach for mixed Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) stands. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, Ankara, v. 38, n. 1, p. 134-147, 2014.

FERRAZ FILHO, A. C. et al. Dominant height projection model with the addition of environmental variables. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 3, p. 427-433, jul./set. 2011.

GONÇALVES, J. L. de M. et al. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 6-27, Aug. 2013.

GONÇALVES, J. L. de M. et al. Produtividade de plantações de eucalipto manejadas nos sistemas de alto fuste e talhadia, em função de fatores edafoclimáticos. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 103, p. 411-419, set. 2014.

GONZÁLEZ-GARCÍA, M. et al. Dynamic growth and yield model including environmental factors for *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden short rotation woody crops in Northwest Spain. **New Forests**, Dordrecht, v. 46, n. 3, p. 387-407, 2015.



GUEDES, I. C. de L. et al. Técnicas geoestatísticas e interpoladores espaciais na estratificação de povoamentos de *Eucalyptus* sp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 3, p. 541-550, jul./set. 2012.

HOSSFELD, J. W. **Mathematikfürforstmänner, ökonomen und cameralisten**. Gotha: Hennings, 1822. v. 4, 310 p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Anuário estatístico da indústria brasileira de árvores**: ano base 2013. Brasília, 2014. 97 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estados**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/>>. Acesso em: 13 ago. 2014.

JAROSZ, K.; KLAPEC, B. Modelowanie wzrostu wysokosci przy pomocy funkcji Gompertza (Height growth modelling using the Gompertz function). **Sylvan**, Warszawa, v. 146, n. 4, p. 35-42, 2002.

JONES, H. G. **Plants and microclimate**: a quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 423 p.

KITIKIDOU, K.; KAYMAKIS, M.; MILIOS, E. Site index curves for young *Populus tremula* stands on Athos Peninsula (northern Greece). **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, Ankara, v. 36, n. 1, p. 55-63, 2012.

KOZAK, A.; KOZAK, R. Does cross validation provide additional information in the evaluation of regression models? **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 33, n. 6, p. 976-987, 2003.

LOPEZ-SENEPLEDA, E. et al. Modeling dominant height growth including site attributes in the GADA approach for *Quercus faginea* Lam. in Spain. **Forest Systems**, Bethesda, v. 23, n. 3, p. 494-499, 2014.

LUNDQVIST, B. On the height growth in cultivated stands of pine and spruce in Northern Sweden. **Medd Fran Statens Skogforsk**, Band, v. 47, n. 2, p. 1-64, 1957.

MELLO, J. M. de et al. Métodos de amostragem e geoestatística para estimativa do número de fustes e volume em plantios de *Eucalyptus grandis*. **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 1, p. 157-166, 2009.

MIRANDA, R. O. V. et al. Modelagem do crescimento e produção em classes de precipitação pluviométrica para *Eucalyptus* sp. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 1, p. 117-128, 2015.

NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M. H. **Applied linear models, regression, analysis of variance and experimental designs**. 3<sup>rd</sup> ed. Boston: RD Irwin, 1990. 842 p.

NUNES, L. et al. Modeling dominant height growth of maritime pine in Portugal using GADA methodology with parameters depending on soil and climate variables. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 68, n. 2, p. 311-323, 2011.

POKHAREL, B.; DECH, J. P. An ecological land classification approach to modeling the production of forest biomass. **The Forestry Chronicle**, Ottawa, v. 87, n. 1, p. 23-32, 2011.

R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2014. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 10 jan. 2014.

RICHARDS, F. J. A flexible growth function for empirical use. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 10, n. 2, p. 290-301, 1959.

RODRÍGUEZ-CARRILLO, A. et al. Compatible dominant height-site index model for juniper (*Juniperus deppeana* Steud.). **Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**, Chapingo, v. 21, n. 1, p. 97-108, 2015.

SAINT-ANDRÉ, L. et al. Slash and litter management effects on Eucalyptus productivity: a synthesis using a growth and yield modelling approach. In: SITE MANAGEMENT AND PRODUCTIVITY IN TROPICAL PLANTATION FORESTS: PROCEEDINGS OF WORKSHOPS IN PIRACICABA, 2008, Bogor. **Proceedings...** Bogor, 2008. p. 173-189.

SCHUMACHER, F. X. A new growth curve and its application to timber yield studies. **Journal of Forestry**, Washington, v. 37, n. 819/820, p. 33, 1939.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: modelos de crescimento e produção florestal. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 393 p.

SCOLFORO, J. R. S. et al. Dominant height model for site classification of *Eucalyptus grandis* incorporating climatic variables. **International Journal of Forestry Research**, Cairo, v. 2013, 2013. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/ijfr/2013/139236/>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1, p. 17-31, 2004.

TOMÉ, J. et al. Age-independent difference equations for modelling tree and stand growth. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 36, n. 7, p. 1621-1630, 2006.

TOMÉ, M. **Modelação do crescimento da árvore individual em povoamentos de Eucalyptus globulus Labill: 1ª rotação**. 1989. 230 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1989.

WATT, M. S. et al. Using seasonal measurements to inform ecophysiology: extracting cardinal growth temperatures for process-based growth models of five Eucalyptus species/crosses from simple field trials. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 44, n. 1, p. 1-11, 2014.

YANG, R. C.; KOZAK, A.; SMITH, J. H. G. The potential of Weibull-type functions as flexible growth curves. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 8, n. 4, p. 424-431, 1978.

**ARTIGO 2** Potencial impacto das alterações climáticas sobre a  
produtividade do sítio de plantações de eucalipto no Brasil

**ARTIGO FORMATADO DE ACORDO COM A NBR 6002 (ABNT,2003),  
conforme orienta o Manual de Normalização da UFLA.**

## RESUMO

Os fatores climáticos afetam a capacidade do local em produzir madeira. O efeito dessa relação pode variar conforme a espécie e sítio. Por ser o maior representante do setor florestal, escolheu-se o gênero *Eucalyptus* para investigar as respostas da produtividade do sítio florestal em decorrência de fatores climáticos na região centro-oeste do Espírito Santo e sul da Bahia. Assim, neste estudo, objetivou-se identificar as variáveis climáticas que mais afetam a capacidade do sítio em produzir madeira e analisar como é essa relação. A base de dados do IFC foi composta por 155 parcelas permanentes em regime de talhadia, das quais 30% delas foram utilizadas para validação cruzada. Os dados climáticos foram provenientes de 31 estações meteorológicas distribuídos sobre a área do estudo. O modelo de Von-Bertalanfy Richards modificado polimórfico foi empregado para prever o potencial madeireiro, definido pelo índice de sítio na idade de referência no caso 7 anos ( $SI_7$ ). Para uma correta interpretação do impacto das condições climáticas sobre o desempenho do povoamento, os dados climáticos foram interpolados para cada parcela. Assim, 6 modelos candidatos para estimar o  $SI_7$  a partir das variáveis climáticas foram testados. Os fatores climáticos precipitação e número de dias de chuva foram as variáveis mais relacionadas com o potencial do local, por isso, foram empregadas para estimar o  $SI_7$ . Essas variáveis apresentaram efeito linear positivo sobre a capacidade do sítio em produzir madeira. A metodologia ainda permite aos gestores florestais prever o potencial produtivo em função de variáveis climáticas em locais sem dados históricos de plantios.

Palavras-chave: Altura dominante, precipitação, crescimento.

## 1 INTRODUÇÃO

Para atender à demanda atual de produtos florestais, a área implantada com eucalipto tem se estendido para regiões além daquelas tradicionais, como a Sul e Sudeste do país. Em 2012, a área brasileira com povoamentos de eucaliptos atingiu 5,1 milhões de hectares, representando 76,6% do total dos plantios florestais no Brasil. Assim, o eucalipto foco desse estudo se firma como o maior representante do setor florestal brasileiro (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2013).

No Brasil, o eucalipto apresenta rápido crescimento e boas adaptações às diferentes condições edafoclimáticas, a produtividade média no país é de  $45 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ , superando países como Uruguai, Chile, Estados Unidos, Canadá e Espanha. A idade de rotação da cultura é de 7 anos, número inferior a países como África do Sul - 8 a 10 anos, Chile 10 a 12 anos, Portugal e Espanha 12 a 15 anos (SOARES et al., 2010).

Historicamente, pesquisas sobre os processos fisiológicos das plantas em função das mudanças climáticas têm sido objetos de muitos estudos. No ambiente da ecologia, o entendimento dessas interações é essencial em termos da tolerância de espécies a condições distintas. No âmbito florestal e agrícola, essas pesquisas dão suporte na seleção do material genético, bem como na definição das estratégias de manejo a serem adotadas nas áreas cultivadas (OTTO et al., 2013).

Estudos da qualidade do sítio florestal tem o objetivo de descrever, classificar e prever a capacidade o local em produzir

madeira. Uma das etapas chaves na modelagem do crescimento e produção florestal é a determinação da capacidade produtiva, que pode ser realizada por métodos diretos e indiretos. O método indireto é baseado em características das espécies, solo e condições climáticas da área. Já, o método direto é realizado a partir de informações sobre a produtividade de espécies que já tenham sido introduzidas no local ou mesmo pelo crescimento médio da altura dominante em função da idade, podendo ser definido como um índice de sítio (SCOLFORO, 2006).

Experimentos, observações, modelos indicam que a produtividade florestal muda com as alterações climáticas, mas a direção e magnitude desses efeitos ainda são incertas (MEDLYN et al., 2011). Dessa forma, o método que relaciona o índice de sítio local com as informações do clima, solo e vegetação possibilita prever mudanças no índice de sítio em decorrência de alterações ambientais, ou seja, simular variabilidades biológicas, edáficas, climáticas e de manejo. Essas simulações são fundamentais para a análise de cenários futuros e planos de suprimento de madeira, uma vez retratam as consequências e não as causas para uma maior ou menor desenvolvimento do povoamento (LANDSBERG, 2003; NOTHDURFT et al., 2012).

Demonstrações da capacidade dessa técnica foram apresentadas por Bravo-Oviedo et al. (2011), onde os autores, utilizando variáveis climáticas para prever o índice de sítio dos povoamentos de *Pinus pinaster* na Espanha, mostraram que as variações dos sítios estavam muito relacionados com a precipitação e temperatura, sendo as melhores qualidades observadas em ambientes mais quentes e húmidos. Já, Paulo et al. (2015), relacionado sítio a variáveis climáticas para *Quercus suber* em



Portugal, constataram que a média mensal da evapotranspiração e a média dos dias de geadas por mês foram as variáveis climáticas mais correlacionadas com a capacidade produtiva do local.

Shen et al. (2015) desenvolveram um modelo correlacionado a sensibilidade do índice de sítio ao clima para a espécie *Larix olgensis* na região nordeste da China. Eles observaram que a capacidade produtiva do local aumenta a medida que aumenta a precipitação e temperatura média anual.

Para o Brasil, país símbolo em produção de madeira oriunda de florestas de rápido crescimento, existe uma lacuna em estudos a respeito de como as variações climáticas podem impactar na capacidade potencial produtiva madeireira local. Sendo assim, este estudo traz como novidade, a observação das variáveis que têm maior impacto sob o índice de sítio e como flutuações dessas variáveis climáticas podem impactar na capacidade potencial produtiva local.

Assim, os objetivos, neste estudo, foram identificar quais as variáveis climáticas que mais impactam na capacidade do local em produzir madeira e como essas variáveis afetam a produtividade dos sítios de plantios clonais de eucalipto localizados nos estados da Bahia e Espírito Santo.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Caracterização fisiográfica e socioeconômica da área de estudo

Os povoamentos de eucaliptos estão localizados no centro-oeste do estado do Espírito Santo e sul da Bahia, com latitude variando de 17°15'S a 20°15'S e a longitude de 39°05'W a 40°20'W. O estado da Bahia está localizado na região Nordeste do Brasil, sendo o quinto maior em área, o quarto mais populoso e representa o oitavo maior PIB do Brasil (3,8% do PIB nacional). O Espírito Santo está localizado na região sudeste do Brasil, sendo o quarto menor em área, o décimo quarto mais populoso e apresenta o décimo primeiro maior PIB do Brasil (2,4% do PIB nacional) (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2014). Para se ter uma ideia da dimensão desses estados, a soma da área deles é superior as dimensões de França e Bélgica juntas.

A classificação climática da área, de acordo com Koppen, oscilam de Aw (clima tropical com precipitação superior à 1500 mm) a Am (clima tropical com precipitação inferior à 250 mm) no estado do Espírito Santo e Aw a BSh (clima árido com temperatura média do ar acima de 18°) no estado da Bahia (ALVARES et al., 2013).

Na Figura 1, apresentam-se as condições climáticas dos estados do Brasil com destaque em vermelho para área do estudo. Nota-se a existência de um leve gradiente climático para os locais do estudo, porém sendo as variações interanuais, nesses locais, cada vez mais presentes. Pela presença das variações interanuais, fica evidente a necessidade de

estudos, observando como e quais as variáveis climáticas impactam a capacidade do local em produzir madeira, tendo em vista a importância da eucaliptocultura para o setor florestal brasileiro (ABRAF, 2013).

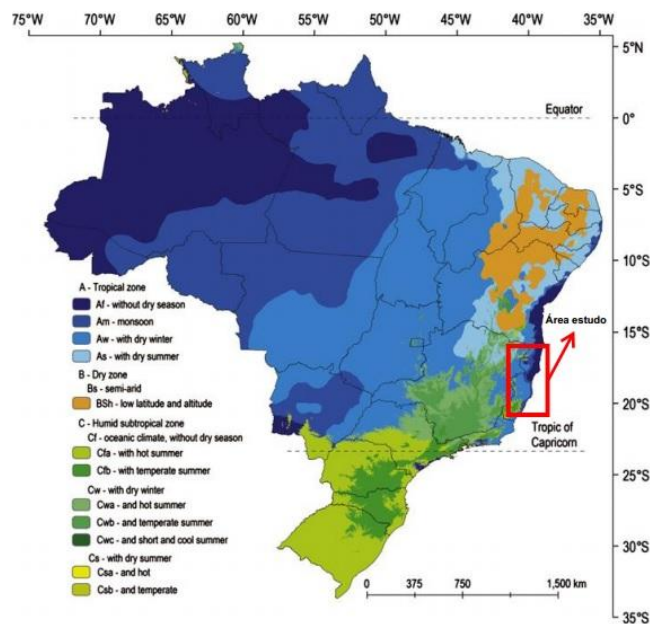


Figura 1 Classificação climática do Brasil com base nos critérios de Köppen (1936), adaptado de Alvares et al. (2013)

## 2.2 Amostragem e obtenção dos dados

O manejo da área é realizado por meio do regime de condução da brotação, denominado de talhadia, o qual tem se destacado no cenário nacional em virtude da redução do custo de produção, pois, não exigem gastos com aquisição de mudas, preparo do solo, irrigação entre outras operações (GONÇALVES et al., 2014).

O conjunto de dados foi composto por dados dendrométricos oriundos do inventário florestal contínuo (IFC) e dados climáticos provenientes de estações meteorológicas. As medições do IFC são referentes ao período de 1994 a 2014, sendo que para cada parcela foram mensuradas as circunferências a 1,30 m em relação ao nível do solo (CAP) de todos os indivíduos, a altura das árvores dominantes presentes nas parcelas, que foram determinadas com base no conceito de Assman (1970).

O plantio clonal de *Eucalyptus urograndis* foi instalado em um espaçamento 3 x 3 m. A amostragem da área contemplou um total de 155 parcelas permanentes de formato circular com área de 500 m<sup>2</sup> e distribuídas de forma sistemática desencontrada (COCHRAN, 1977). As estatísticas descritivas do manejo por talhadia estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 Estatísticas descritivas referentes ao regime de manejo de talhadia

Inventário Florestal Contínuo		Dados do Ajuste		
Variáveis	Unidade	Mínima	Média	Máxima
Idade Inicial ( $t_0$ )	ano	1,000	3,237	5,800
Idade Final ( $t$ )	ano	1,500	3,918	6,670
Altura Dominante na $t_0$ ( $hd_0$ )	m	6,010	16,935	31,020
Altura Dominante na $t$ ( $hd$ )	m	7,900	19,308	31,100
Incremento Anual em Altura Dominante	m	0,053	3,954	11,500
Número de remedições por parcela	-	1,000	3,000	9,000

A base climática foi proveniente de 31 estações meteorológicas próximas ao plantio florestal, conforme apresentado na Figura 2. Os

dados climáticos são referentes ao mesmo período da base do IFC. A partir das estações meteorológicas foram extraídos dados diários de precipitação, temperatura (mínima, média e máxima), radiação solar e umidade relativa. Na Tabela 2, apresentam-se as estatísticas relacionadas ao clima da área do estudo.

Tabela 2 Estatísticas descritivas das variáveis climáticas

<b>Legenda</b>	<b>Variável</b>	<b>Unidade</b>	<b>Menor</b>	<b>Médio</b>	<b>Maior</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coefficiente Variação</b>
MPPT	Média mensal da precipitação período	mm.mês <sup>-1</sup>	87,583	108,370	132,819	12,153	0,112
MDC	Média mensal dos dias de chuva período	dias.mês <sup>-1</sup>	10,962	13,077	15,511	1,064	0,081
MTIMIN	Média mensal da temperatura mínima período	°C.mês <sup>-1</sup>	20,404	21,008	21,415	0,171	0,008
MTMED	Média mensal da temperatura média período	°C.mês <sup>-1</sup>	23,406	23,820	24,565	0,165	0,007
MTMAX	Média mensal da temperatura máxima período	°C.mês <sup>-1</sup>	26,369	27,066	28,190	0,270	0,010
MRAD	Média mensal da radiação solar período	MJ.m <sup>-2</sup> .mês <sup>-1</sup>	17,048	17,724	18,520	0,359	0,020
MDPV	Média mensal déficit pressão de vapor período	KPa.mês <sup>-1</sup>	0,456	0,500	0,579	0,030	0,061

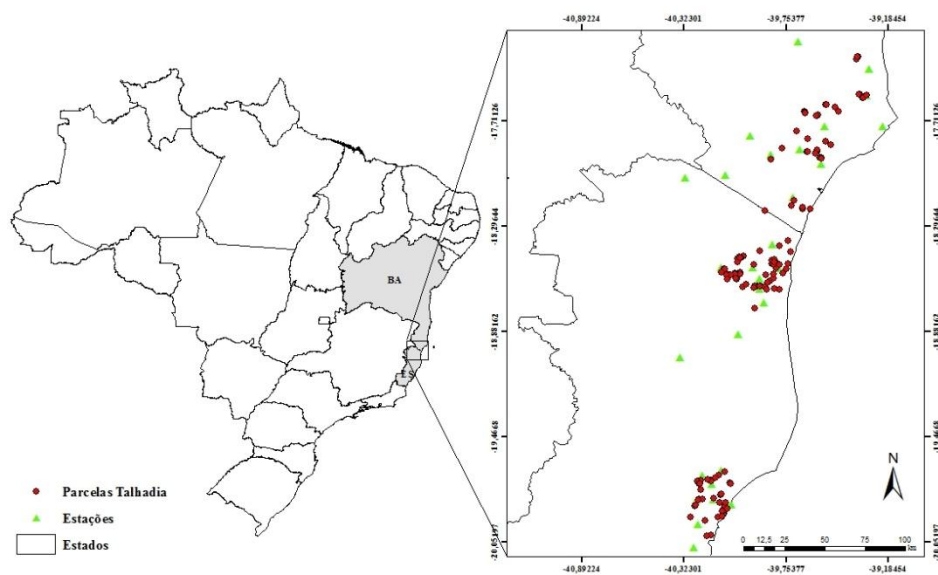


Figura 2 Distribuição das parcelas e estações meteorológicas para a área do estudo

### 2.3 Projeção da altura dominante

O método da diferença algébrica desenvolvido por Bailey e Clutter (1974) foi utilizado para modelar a altura dominante do eucalipto. Esse método apresenta a vantagem de estimar o índice de sítio independente da escolha da idade de referência (ARIAS-RODIL et al., 2015).

De acordo com Ciesszewski, Strub e Zasada (2007), o método consiste em: i) escolher uma equação para modelar a variável de interesse, ii) decidir qual parâmetro será em função da qualidade teórica do sítio ( $X$ ) e expressar a relação, por meio de uma equação matemática, iii) resolver a equação para  $X$ , iv) inserir a solução de  $X$  para obter a equação dinâmica de  $hd = f(t, X)$  para as condições iniciais de  $t_0$  e  $hd_0$ .

O modelo de Richards (1959) modificado foi empregado para representar o desenvolvimento da altura dominante e conseqüentemente do índice de sítio para cada uma das parcelas. A equação ajustada foi selecionada do artigo 1 desse trabalho, onde definiu-se que esse modelo foi o mais adequado para representar o desenvolvimento da altura dominante, considerando esse mesmo conjunto de dados. Assim, a equação utilizada para estimativa do  $SI_7$  foi:

$$SI_7 = 33,953 (h_0/33,953)^{(\ln(1-\exp(-0,206t)))/(\ln(1-\exp(-0,206t_0)))}$$

Em que:  $SI_7$  é o índice de sítio na idade  $t$ , a qual foi de sete anos para esse estudo;  $h_0$  é altura dominante na idade  $t_0$ .

#### **2.4 Modelagem do índice de sítio sensível ao clima**

Uma vez selecionada a equação para estimativa do  $SI_7$ , analisou-se como as variações do clima impactam na capacidade do local em produzir madeira, ou seja, avaliar quais e como elas afetam a qualidade do local.

Para isso, as variáveis climáticas foram interpoladas para as parcelas do inventário florestal, através do método Inverso Quadrado da Distância (IQD). A escolha dessa metodologia se deu pela fraca dependência espacial, em razão da grande distância entre as estações. Mais detalhes sobre esse método podem ser encontrados em Mello et al. (2003).

Somente após essa interpolação foi possível relacionar a capacidade produtiva do local com as condições climáticas sobre ele.



Primeiro foi realizada uma análise do comportamento das variáveis climáticas para caracterizar as oscilações interanuais durante a fase do estudo. Em seguida, foi feita uma correlação de Pearson entre as variáveis climáticas e  $SI_7$ , a fim de identificar as variáveis mais significativas para representar a capacidade produtiva do local.

Assim, foram selecionados 6 modelos candidatos para expressar a capacidade produtiva do sítio em função das variações climáticas (Tabela 3). A calibração dos modelos foi realizada por meio do pacote `lm` para ajuste linear do software R 3.1.2 (R CORE TEAM, 2014).

Tabela 3 Modelos candidatos para estimativa do  $SI_7$  a partir de variáveis climáticas

ID	Modelo
MC1	$SI_7 = \beta_0 + \beta_1 * MDC * MPPT$
MC2	$SI_7 = \beta_0 + \beta_1 * MPPT$
MC3	$SI_7 = \beta_0 + \beta_1 * MDC$
MC4	$SI_7 = \beta_0 + \beta_1 * (1/(MDC * MPPT))$
MC5	$SI_7 = \beta_0 + \beta_1 * (1/MPPT)$
MC6	$SI_7 = \beta_0 + \beta_1 * (1/MDC)$

## 2.5 Avaliação das equações de sítio sensíveis ao clima

Os modelos candidatos para estimativa do  $SI_7$  a partir de variáveis climáticas foram avaliados em duas etapas. A primeira por meio das estatísticas descritivas, sendo calculado para essa fase o  $R^2$  ajustado na regressão linear ( $MEF_{adj}$ ), raiz quadrada média do erro (RMSE) e média residual ( $\bar{e}$ ), em metros. As equações para esses índices estão apresentadas a seguir:

$$MEF_{adj} = 1 - \frac{n - 1 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}$$

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)$$

Em que:  $p$  é o número de parâmetros da equação,  $n$  é o número de observações,  $y_i$  é a altura dominante observada e  $\hat{y}_i$  é a altura dominante predita.

Na segunda etapa de avaliação, as equações ajustadas foram testadas em uma base de dados independente daquela utilizada para a calibragem dos modelos. A base para a validação preditiva foi composta por 47 parcelas (30% do total de parcelas) sendo calculadas para essa fase as estatísticas do erro médio absoluto (MAE, %), erro médio (T, %) e índice de Willmott (D):

$$MAE (\%) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \right)}{n} \right) 100$$

$$T (\%) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)}{n} \right) 100$$

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{y}_i| + |\hat{y}_i - \bar{y}_i|)^2}$$

Em que: n é o número de observações,  $y_i$  é a altura dominante observada,  $\hat{y}_i$  é a altura dominante predita e  $\bar{y}_i$  é a média da altura dominante observada.

A medida do erro médio é dado por MAE e a média dos erros por T, sendo quanto mais próxima de zero melhor. O índice de Willmott representado por D também foi calculado, sendo quanto maior o valor, melhor a performance da equação modelo (ANGULO-MARTINEZ et al., 2009).

## **2.6 Cenários de produtividade a partir de variações climática**

Após identificar o modelo climático que apresentou maior desempenho para expressar o potencial do sítio, investigou-se a sensibilidade da capacidade produtiva do local a partir das variações climáticas plausíveis de ocorrência. Para isso, considerou uma amplitude de variação climática de uma média, mais ou menos, três desvios para cada variável do modelo. Assim, foi possível identificar as condições climáticas que aumentam a capacidade do sítio em produzir madeira bem como as situações que reduzem esse potencial.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Seleção do modelo para estimativa do índice de sítio

A equação utilizada para representar o desenvolvimento da altura dominante apresentou valor absoluto da raiz quadrada média do erro (RMSE) de 1,194 m e média residual de 0,101 m. Nenhuma diferença significativa foi encontrada entre os valores preditos e observados na fase de validação, além disso, foi verificado que 99,4% dos valores estão dentro do intervalo das curvas de sítio.

Adicionalmente, verificou-se a estabilidade do modelo onde 81% das parcelas não apresentaram mudança de classe, em 14% tiveram uma alteração e em apenas 5% foram observadas mais de uma mudança durante a projeção, o que viabiliza o uso da equação. Na figura 3, mostram-se as curvas médias do sítio com intervalo entre classe de 4 m.

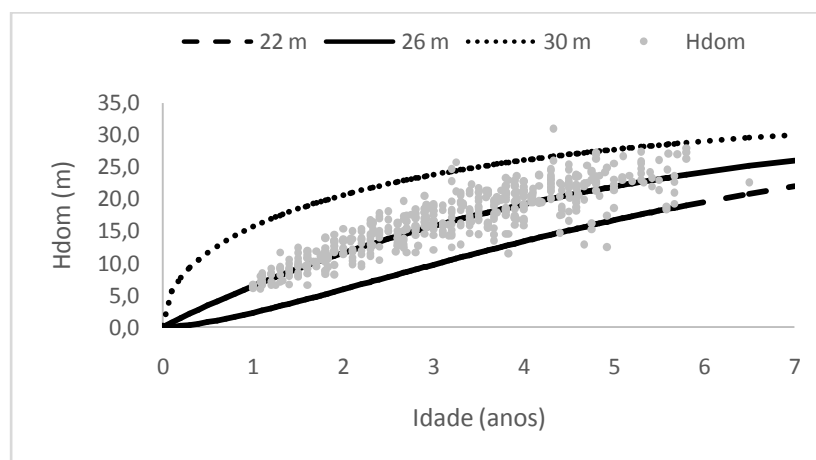


Figura 3 Curvas de índices de sítios com idade de referência de 7 anos para o eucalipto no regime de talhadia

Um procedimento chave para todo o sistema de prognose é a determinação da capacidade produtiva do local, representada pelo índice de sítio. Assim, uma vez confirmada a boa performance do modelo ajustado, o  $SI_7$  de cada par altura-idade foi estimado. Esse potencial produtivo está associado aos fatores genéticos e do ambiente, como apresentado por Scolforo et al. (2013). Nesse sentido, associamos o  $SI_7$  com as variáveis climáticas na tentativa de observar as que apresentam maior impacto sobre o sítio e mostrar como é essa relação.

### **3.2 Comportamento das variáveis climáticas**

Para um bom entendimento de como as variáveis climáticas podem influenciar na capacidade produtiva do sítio florestal, é importante avaliar o comportamento delas durante a fase do estudo. Assim sendo, a figura 04 mostra a distribuição da precipitação obtida na região do estudo para o período de 1994 – 2014. Importante notar a alta variabilidade dessas variáveis, chegando a 1709,6 mm em 2005 até 811,7 mm em 2014, quando a média para a região foi de 1220,3 mm. Da mesma forma para número de dias com chuva no ano, tendo 193 dias de chuva em 2005 até 118 dias em 1994, sendo a média de 150 dias. Essas oscilações interanuais relacionadas à chuva, segundo Almeida, Ribeiro e Leite (2013), podem reduzir ou acelerar o crescimento do eucalipto, mostrando, assim, a sensibilidade dessa cultura para as alterações climáticas.

Nota- se uma leve tendência de redução da temperatura média nos últimos anos, variando de 25,4°C em 1995 até 22,4 °C em 2012, média de 23,8 °C. Santana et al. (2008) observaram um aumento da biomassa de

povoamentos de eucaliptos no Brasil com um aumento da temperatura média anual. Da mesma forma, há uma tendência de redução da temperatura máxima, a qual apresentou valores variando de 30,2 °C em 2005 até 23,6 °C em 2014 com média do período de 27,1 °C. Também foi possível observar uma tendência de aumento da temperatura mínima que oscilou de 22,5°C em 2010 até 20°C em 1999 (Figura 4).

A radiação também apresentou heterogeneidade no comportamento durante o período, chegando a média de 18,6 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> em 2007 até 16,9 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> em 2010, quando a média da região durante o período de estudo foi de 17,6 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>. De acordo com Reis et al. (2014), a radiação solar e temperatura do ar são um dos fatores climáticos que influenciam a abertura e fechamento estomático, contribuindo, assim, para maior ou menor transferência de vapor de água para a atmosfera (Figura 4).

O déficit de pressão de vapor apresentou uma tendência positiva no período, chegando a 0,65 KPa em 2010 até 0,31 KPa no de 2000, média do intervalo de 0,50 KPa. Otto et al. (2013) mostraram a alta correlação do déficit de pressão de vapor com a abertura estomática, sendo observado menor crescimento para as condições de maior déficit de pressão de vapor (Figura 4).

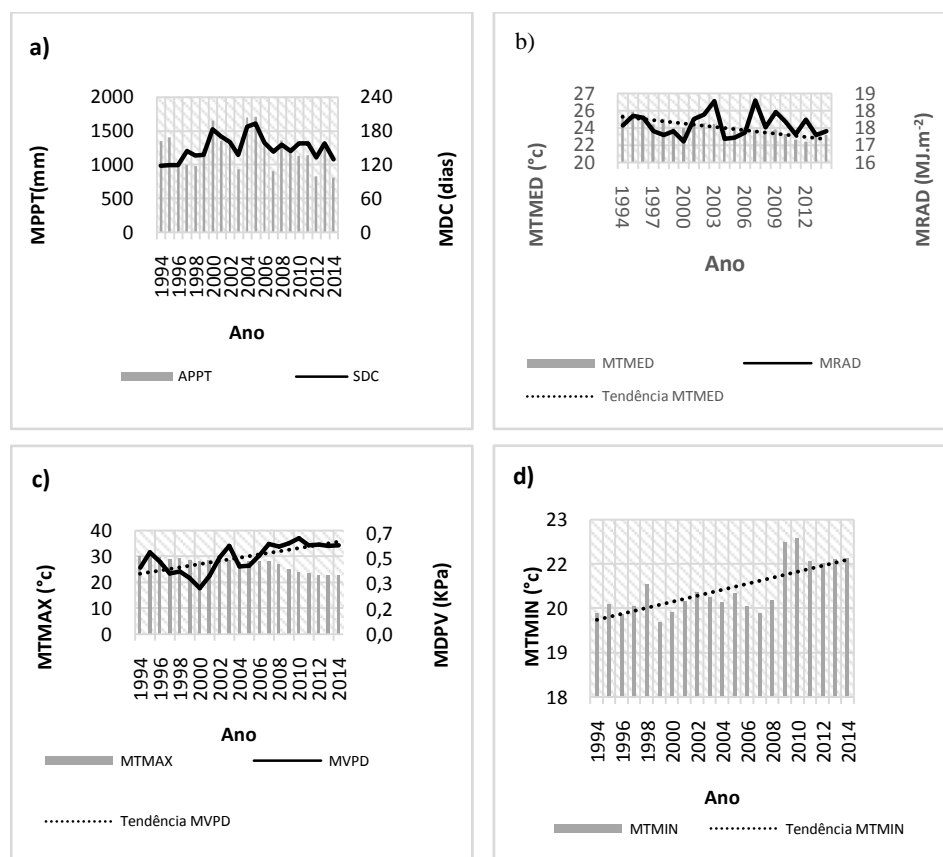


Figura 4 Variações climáticas interanuais médias da precipitação e dias de chuvas (a), temperatura média e radiação (b), temperatura máxima e déficit de pressão de vapor (c) e temperatura mínima (d) para a região do estudo durante o período de 1994-2014

Com base nas análises preliminares dos dados climáticos, fica evidente a grande oscilação interanual das variáveis, sobretudo em relação à precipitação que apresentou diferenças abruptas entre os anos. Essa variação pode impactar no comportamento do crescimento florestal, sobretudo de espécies com rápido desenvolvimento como é o caso do eucalipto (MAESTRI et al., 2013). Nesse sentido, muitos estudos estão

sendo desenvolvidos, relacionando a capacidade produtiva do sítio com as variáveis climáticas, podendo citar os trabalhos recentes de Paulo et al. (2015) e Shen et al. (2015).

### 3.3 Índice de sítio e variáveis climáticas

Os resultados indicam que apenas as variáveis precipitação média mensal (MPPT) e número de dias de chuva médio mensal (MDC) foram significativos e apresentaram correlação positiva com a capacidade produtiva do local, conforme a lógica do crescimento florestal (Tabela 4). As outras variáveis climáticas não apresentaram correlação significativa com o  $SI_7$ , pois, conforme a figura 4, a variação interanual foi pequena, diferentemente da precipitação que mostrou muita variação durante o período.

Tabela 4 Coeficiente de correlação de Pearson entre  $SI_7$  e variáveis climáticas

Variável	Variável Climática	Pearson	p-value
$SI_7$	MDC	0,38	0,0000078
$SI_7$	MPPT	0,38	0,0000082
$SI_7$	MRAD	0,14	0,0958400
$SI_7$	MTMAX	-0,08	0,3808000
$SI_7$	MTEMD	-0,09	0,2946000
$SI_7$	MTMIN	-0,17	0,0678000
$SI_7$	MDPV	-0,11	0,0606459

Assim, utilizamos apenas as variáveis precipitação e número de dias de chuva para expressar o potencial produtivo do local, corroborando



com os resultados encontrados no artigo 1, desta dissertação, onde essa combinação foi a mais indicada para o incremento em altura dominante do eucalipto submetido ao manejo de talhadia nos estados do Espírito Santo e Bahia.

Baker, Appleton e Stokes (2000) demonstraram que um aumento de 100 mm na precipitação proporcionou um incremento de  $4 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  em povoamentos de eucalipto na Austrália. Já, Otto et al. (2013) mostram que a distribuição da precipitação é tão importante quanto o total precipitado, pois a água é um dos fatores determinantes do crescimento, sendo necessária durante todo o período de desenvolvimento.

Dessa forma, foram propostos 6 modelos com diferentes combinações entre precipitação e dias de chuva a fim de identificar a melhor performance. A tabela 5 exibe os resultados estatísticos bem como os parâmetros estimados para os modelos candidatos. As estatísticas computadas na fase de validação utilizando uma base de dados independente também estão mostradas na tabela 5. Todos os parâmetros foram estatisticamente diferentes de zero ( $p < 0,0001$ ), apresentaram magnitude consistente e sinal apropriado para estimativa do  $SI_7$ .

Tabela 5 Parâmetros estimados, estatísticas do ajuste e validação cruzada dos modelos candidatos para SI<sub>7</sub> sensíveis ao clima

ID	Parâmetros		Estatísticas Ajuste			Estatísticas Validação		
	$\beta_0$	$\beta_1$	MEF	RMSE	$\bar{e}$	MAE %	T %	D
MC1	22,870	0,003	0,196	1,475	2,253E-03	4,37%	-0,69%	0,459
MC2	20,371	0,058	0,163	1,505	-9,856E-05	4,40%	-0,65%	0,407
MC3	19,442	0,559	0,139	1,527	-4,695E-04	4,48%	-0,82%	0,451
MC4	31,281	-6339,923	0,176	1,494	-2,069E-04	4,37%	-0,79%	0,476
MC5	33,544	-737,308	0,180	1,490	-2,909E-04	4,44%	-0,79%	0,476
MC6	33,813	-91,815	0,127	1,537	-3,624E-05	4,46%	-0,86%	0,441

O modelo MC1 apresentou o maior desempenho entre os modelos candidatos, sendo a precipitação média mensal e número de dias de chuva médio mensal as variáveis explicativas para esse modelo, o baixo valor de RMSE (1,475 m) indica um bom ajuste do modelo na projeção dos dados, os resultados na fase de validação confirmam a flexibilidade do modelo proposto (Tabela 5).

Existem muitas diferenças nos resultados encontrados dos estudos de Monserud et al. (2008), Pinno et al. (2010) e Sabatia e Burkhart (2014), indicando que a relação clima e produtividade florestal é muito variada. Utilizando apenas variáveis climáticas, nosso modelo empírico poderia explicar 19,6% da variação do  $SI_7$ , sinalizando que o índice de sítio também é afetado por outras variáveis ambientais, como mostrado por Pino et al. (2009).

Os resultados também evidenciam a complexidade da modelagem da capacidade produtiva do local, a partir de variáveis climáticas, já que espécies de rápido crescimento, como é o caso do eucalipto, os efeitos das alterações climáticas interanuais provocam mudanças no comportamento do crescimento florestal como mostrado no artigo 1 deste trabalho.

Na Figura 5, apresenta-se o comportamento dos resíduos em função dos valores preditos de  $SI_7$  para o modelo MC1, em relação à base de validação preditiva para o regime de manejo de talhadia, indicando nenhuma evidência óbvia de heterocedasticidade.

Na Figura 5, apresenta-se o comportamento dos resíduos em função dos valores preditos de  $SI_7$  para os modelos candidatos em relação à base de validação preditiva para o regime de manejo de talhadia. Os resultados mostram um comportamento semelhante dos resíduos entre os

modelos, indicando nenhuma evidência óbvia de heterocedasticidade. Assim, como o modelo MC1 apresentou os melhores índices estatísticos (Tabela 5) foi o escolhido para a sequência das análises.

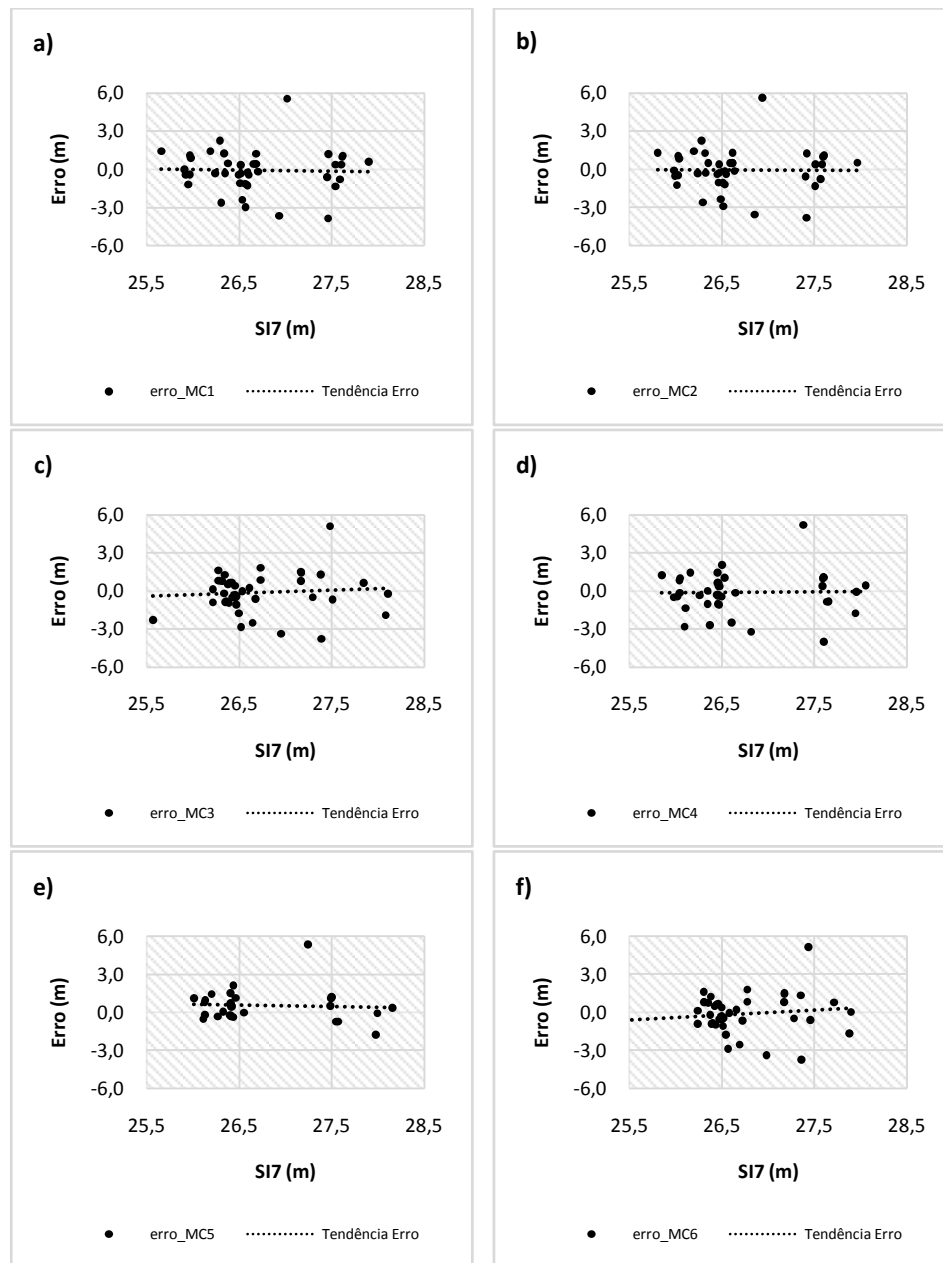


Figura 5 Distribuição dos resíduos dos modelos climáticos MC1 (a), MC2 (b), MC3 (c), MC4 (d), MC5 (e) e MC3 (f) em relação aos valores preditos de  $SI_7$

Apesar de algumas limitações, segundo Skovsgard e Vanclay (2008), o índice de sítio é o indicador mais empregado para quantificar a produtividade do local e, conseqüentemente, avaliar o crescimento florestal. Utilizando os modelos tradicionais de crescimento e produção, é difícil prever o crescimento do povoamento sobre mudanças climáticas que possam vir a acontecer, pois, o índice de sítio assume ser constante (SCOLFORO et al., 2013). Dessa forma, modelos que descrevem a relação índice de sítio e fatores edafoclimáticos têm ganhado cada vez mais espaços no contexto da modelagem florestal, facilitando, assim, a predição da produção do povoamento em decorrência das alterações climáticas, como mostrados nos trabalhos de Jiang et al. (2014) e Weiskittel, Crookston e Radtke (2011).

### **3.4 Sensibilidade climática do modelo de índice de sítio**

Para predição da mudança do  $SI_7$  em resposta a alterações climáticas, foi realizada uma nova calibragem dos parâmetros do modelo MC1 com a utilização da base total proveniente do IFC. Assim, o modelo selecionado para predição do índice de sítio na idade de 7 anos para povoamentos de eucaliptos no regime de manejo de talhadia, ficou da seguinte forma:

$$SI_7 = 22,770 + 0,003 * MDC * MPPT$$

Em que:  $SI_7$  é o índice de sítio estimado na idade de 7 anos;  $MPPT$  é a precipitação média mensal;  $MDC$  é a média mensal do número de dias de chuva.

O efeito da precipitação revela um comportamento linear positivo, sendo os maiores potenciais produtivos em locais com mais chuva (Figura 6). O índice de sítio para o eucalipto dentro da área do estudo aumenta para mais chuva, como era esperado uma vez que a precipitação tem forte influência sobre o desenvolvimento biológico, como também foi observado no estudo de Miranda et al. (2014), onde a precipitação média apresentou forte influência sobre o crescimento em altura das árvores dominantes de eucalipto no estado da Bahia.

Novamente, no estado Bahia, Gonçalves et al. (2015) concluíram que a produtividade de brotações de eucalipto está estritamente condicionada ao regime pluviométrico, sendo as maiores produções relacionadas aos locais com mais chuva, como também demonstrado nessa pesquisa.

Os resultados também indicam a importância da distribuição da chuva na análise da qualidade do sítio, pois, espera-se menor produtividade em locais com chuvas mais concentradas como demonstrado na figura 6.

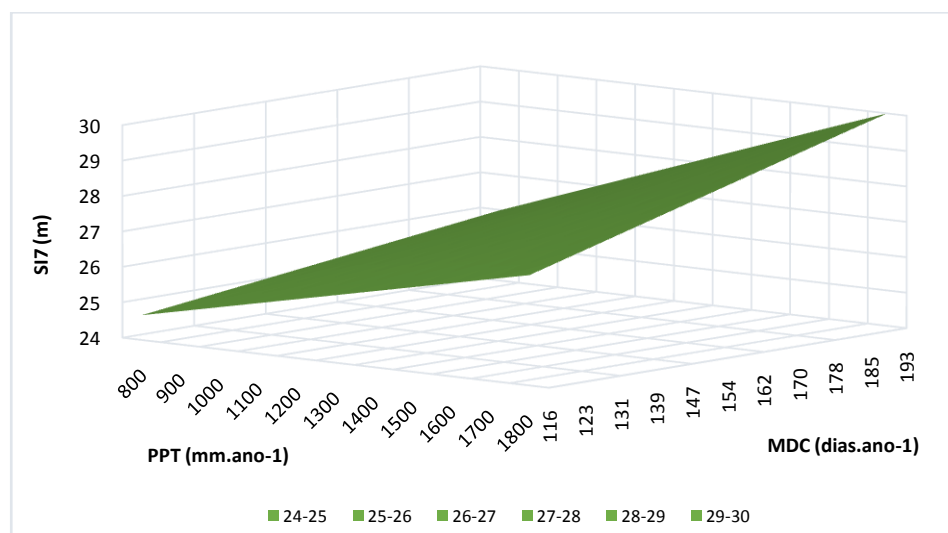


Figura 6 Efeito da precipitação e número de dias de chuva sobre o índice de sítio na idade de 7 anos ( $SI_7$ )

O comportamento da precipitação interanual durante o intervalo do estudo é muito variada, como apresentado na figura 4, porém, durante o período de 2001 a 2007 foi observada média de  $1320,5 \text{ mm.ano}^{-1}$  distribuídos, em média, de  $164 \text{ dias. ano}^{-1}$ , contra, por exemplo,  $1109,2 \text{ mm.ano}^{-1}$  em  $148 \text{ dias.ano}^{-1}$  no período de 2008 a 2014. Assim, de acordo com o modelo proposto esperava-se maior produtividade do local no intervalo de 2001 a 2007 (Tabela 6).

Tabela 6 Capacidade produtiva do sítio durante o período da pesquisa

Variável	Unidade	Período		
		1994 - 2000	2001 - 2007	2008 - 2014
PPT	$\text{mm.ano}^{-1}$	1231,0	1320,5	1109,2
DC	$\text{dias.ano}^{-1}$	137,0	164,0	148,0
$SI_7$	m	26,3	27,3	26,2



Neste trabalho, desenvolveu-se um modelo de índice de sítio sensível as alterações do clima. Os fatores climáticos foram utilizados para isso, as variáveis precipitação e número de dias de chuva durante o período de estudo foram empregadas para prever o índice de sítio na idade de 7 anos. Muitos estudos têm mostrado que as variáveis climáticas são efetivas e usuais para a predição da capacidade produtiva do sítio, como mostrados nos trabalhos de Lutz, Shugart e White (2013) e Xenakis, Ray e Mencuccini (2012).

Uma questão chave enfrentada pelas grandes empresas do setor florestal é prever a capacidade produtiva de um determinado sítio sem dados histórico prévios de plantios. Em se tratando do Brasil, isso é importante, uma vez que as condições climáticas são bem distintas entre os estados, como exibido na figura 1 adaptado do trabalho de Alvares et al. (2013). Essa metodologia contribui ainda para compreender o efeito do clima sobre a capacidade produtiva do local, ajudando, assim, a prever cenários de produtividade em meio às oscilações climáticas, já que a previsão climática continua sendo muito incerta.

A metodologia também serve como base para o planejamento silvicultural, visto que um cenário otimista de precipitação e sua distribuição no ano indica um caminho de manejo, no entanto, se o cenário for pessimista, o regime pode ser totalmente diferente. Assim, permite aos gestores florestais preverem gastos com adubações corretivas em sítios com baixa disponibilidade de água, já que essas condições corroboram para o aparecimento de deficiências nutricionais em povoamentos de eucalipto.

## 4 CONCLUSÃO

Os modelos sensíveis ao clima são importantes para se projetar e entender os efeitos climáticos sobre a capacidade produtiva do local. O modelo proposto para estimativa do índice de sítio na idade de 7 anos (SI<sub>7</sub>) apresentou magnitude consistente e sensibilidade às condições climáticas. Os fatores climáticos precipitação e número de dias de chuva foram as variáveis mais relacionadas com a capacidade produtiva do local. A precipitação e número de dias de chuva apresentaram efeito linear positivo sobre o índice de sítio, assim, espera-se maior potencial madeireiro em locais com mais chuvas bem distribuídas.

Essa metodologia apresenta potencial para o setor florestal brasileiro, pois, permite aos gestores prever cenários de produtividade em locais sem dados históricos de plantios, em decorrência de variações climáticas, considerando o mesmo material genético e sobre as mesmas condições de manejo.

**ARTICLE 2 POTENTIAL IMPACT OF CLIMATE CHANGES  
ABOUT THE SITE PRODUCTIVITY OF EUCALYPTUS  
PLANTATIONS IN BRAZIL**

**ABSTRACT**

Climate factors affect the site capacity in wood production. The effect of this relation may vary according to specie and site. In this study, the genus *Eucalyptus* was selected to research about productivity responses of forest site by being the most representative in this sector in terms of climate changes in Midwest Region of the State of Espírito Santo and Southern Bahia. Thus, we sought to identify climate variables that most affect the site capacity in wood production, and to analyze the pattern of this relation. The IFC database consisted of 155 permanent plots in the coppice management regime, from which 30% were used for the cross-validation. Climate data were obtained from 31 meteorological stations distributed in the area under study. The polymorphic modified Von-Bertalanffy Richards model was used to predict the timber potential, defined here as the site index at the reference age, in case 7 years ( $SI_7$ ). For a correct interpretation of the impact of climate changes on the plantation performance, climate data were interpolated for each plot. Thus, six candidate models to estimate the  $SI_7$  from climate variables were tested. The precipitation and number of rainy days were used to estimate the  $SI_7$  because they were the most related variables with the site potential. They showed positive linear effect on the site capacity to produce wood. Therefore, this methodology allows managers to predict the forest productive potential based on climate variables in sites without historical data of plantations.

Key-words: Dominant height. Precipitation. Growth.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. Q.; RIBEIRO, A.; LEITE, F. P. Modelagem do balanço hídrico em microbacia cultivada com plantio comercial de *Eucalyptus grandis* X *urophylla* no leste de Minas Gerais, Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 37, n. 3, p. 547-556, 2013.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANGULO-MARTÍNEZ, M.; BEGUERÍA, S. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: a comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 379, n. 1, p. 111-121, 2009.

ARIAS-RODIL, M. et al. Evaluation of age-independent methods of estimating site index and predicting height growth: a case study for maritime pine in Asturias (NW Spain). **European Journal of Forest Research**, Georgetown, v. 134, n. 2, p. 223-233, 2015.

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**: studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands. Oxford: Pergamon, 1970. 520 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico**: ano base 2012. Brasília, 2013. 148 p.

BAILEY, R. L.; CLUTTER, J. L. Base-age invariant polymorphic site curves. **Forest Science**, Bethesda, v. 20, n. 2, p. 155-159, 1974.

BAKER, T. G.; APPLETON, R.; STOKES, R. C. **Growth of eucalypt plantation species across twelve sites in Gippsland, Victoria**. Victoria: Department of Natural Resources and Environment, 2000. 46 p.

BRAVO-OVIEDO, A. et al. Environmental variability and its relationship to site index in Mediterranean maritime pine. **Forest Systems**, Berlin, v. 20, n. 1, p. 50-64, 2011.

CIESZEWSKI, C. J.; STRUB, M.; ZASADA, M. New dynamic site equation that fits best the Schwappach data for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Central Europe. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 243, n. 1, p. 83-93, 2007.

COCHRAN, W. G. **Sampling techniques**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Wiley, 1977. 555 p.

GONÇALVES, J. L. de M. et al. Produtividade de plantações de eucalipto manejadas nos sistemas de alto fuste e talhadia, em função de fatores edafoclimáticos. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 103, p. 411-419, set. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estados**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/>>. Acesso em: 13 ago. 2014.

JIANG, H. et al. Climate-and soil-based models of site productivity in eastern US tree species. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 45, n. 3, p. 325-342, 2014.

KOEPPEN, W. **Das geographische system der klimate, handbuch der klimatologie**. Berlin: Verlangvon Gebrüder Borntraeger, 1936. 44 p.

LANDSBERG, J. Physiology in forest models: history and the future. **FBMIS**, Oxford, v. 1, p. 49-63, 2003.

LUTZ, D. A.; SHUGART, H. H.; WHITE, M. A. Sensitivity of Russian forest timber harvest and carbon storage to temperature increase. **Forestry**, Oxford, v. 86, n. 2, p. 283-293, 2013.

MAESTRI, R. et al. Modelagem do crescimento florestal considerando variáveis do ambiente: revisão. **Scientia Agraria**, Piracicaba, v. 14, n. 3, p. 103-110, set./dez. 2013.

MEDLYN, B. E. et al. Reconciling the optimal and empirical approaches to modelling stomatal conductance. **Global Change Biology**, Oxford, v. 17, n. 6, p. 2134-2144, 2011.

MELLO, C. R. de et al. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 925-933, 2003.

MIRANDA, R. O. V. et al. Modelagem do crescimento e produção em classes de precipitação pluviométrica para *Eucalyptus* sp. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 1, p. 117-128, 2015.

MONSERUD, R. A. et al. Potential change in lodgepole pine site index and distribution under climatic change in Alberta. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 38, n. 2, p. 343-352, 2008.

NOTHDURFT, A. et al. Spatio-temporal prediction of site index based on forest inventories and climate change scenarios. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 279, p. 97-111, Sept. 2012.

OTTO, M. S. G. et al. Fotossíntese, condutância estomática e produtividade de clones de Eucalyptus sob diferentes condições edafoclimáticas. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 37, n. 3, p. 431-439, 2013.

PAULO, J. A. et al. Predicting site index from climate and soil variables for cork oak (*Quercus suber* L.) stands in Portugal. **New Forests**, Dordrecht, v. 46, n. 2, p. 293-307, 2015.

PINNO, B. D. et al. Predicting productivity of trembling aspen in the Boreal Shield ecozone of Quebec using different sources of soil and site information. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 257, n. 3, p. 782-789, 2009.

R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2014. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 10 fev. 2014.

REIS, M. G. et al. Balanço hídrico e de energia para plantios de eucalipto com cobertura parcial do solo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 1, p. 117-126, 2014.

RICHARDS, F. J. A flexible growth function for empirical use. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 10, n. 2, p. 290-301, 1959.

SABATIA, C. O.; BURKHART, H. E. Predicting site index of plantation loblolly pine from biophysical variables. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 326, p. 142-156, Aug. 2014.

SANTANA, R. C. et al. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 697-706, jul./ago. 2008.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: modelos de crescimento e produção florestal. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 393 p.

SCOLFORO, J. R. S. et al. Dominant height model for site classification of *Eucalyptus grandis* incorporating climatic variables. **International Journal of Forestry Research**, Cairo, v. 2013, 2013. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/ijfr/2013/139236/>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

SHEN, C. et al. Potential impacts of regional climate change on site productivity of *Larix olgensis* plantations in northeast China. **iForest-Biogeosciences and Forestry**, Bologna, 2015. Disponível em: <<http://www.sisef.it/iforest/contents/?id=ifor1203-007>>. Acesso em: 10 mar. 2015.

SKOVSGAARD, J. P.; VANCLAY, J. K. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. **Forestry**, Oxford, v. 81, n. 1, p. 13-31, 2008.

SOARES, N. S. et al. Competitividade da cadeia produtiva da madeira de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 34, n. 5, p. 917-928, 2010.

WEISKITTEL, A. R.; CROOKSTON, N. L.; RADTKE, P. J. Linking climate, gross primary productivity, and site index across forests of the western United States. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 41, n. 8, p. 1710-1721, 2011.

XENAKIS, G.; RAY, D.; MENCUCCINI, M. Effects of climate and site characteristics on Scots pine growth. **European Journal of Forest Research**, Georgetown, v. 131, n. 2, p. 427-439, 2012.