

EQUAÇÕES HIPSOMÉTRICAS PARA PLANTIOS MISTOS DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL NA MATA ATLÂNTICA EM SEROPÉDICA-RJ

Camila Mayer Massaroth Staub¹, Carlos Roberto Sanquetta², Ana Paula Dalla Corte², Mateus Niroh Inoue Sanquetta³, Bruna Nascimento de Vasconcellos¹

1 – Mestranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná. (camilamassaroth@gmail.com)

2 - Eng. Florestal, Dr., Professor, Universidade Federal do Paraná

3 - Discente do Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná

Centro BIOFIX de Pesquisa em Biomassa e Sequestro de Carbono
Universidade Federal do Paraná – UFPR
Av. Lothário Meissner, 900 – Jardim Botânico
Curitiba – PR 80.210-170 – Brasil

Recebido em: 30/09/2014 – Aprovado em: 15/11/2014 – Publicado em: 01/12/2014

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi ajustar equações hipsométricas para um povoamento de restauração ambiental composto por 79 espécies nativas da Mata Atlântica. Foram analisados dados reais de 180 árvores cujas alturas foram medidas diretamente com trena, após seu abate. Foi empregada a técnica de regressão linear, utilizando-se dez diferentes modelos para a estimativa de altura total a partir do diâmetro à altura do peito (*dap*). Os modelos foram testados e as equações ajustadas foram comparadas pelos parâmetros coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), erro padrão da estimativa em percentagem ($S_{yx}\%$), critérios de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC) e o índice de concordância de Willmott (*dW*). Os resultados indicaram que, com base na comparação entre estes parâmetros, o modelo mais adequado foi de Stofells ($R^2_{aj.}$ de 0,6064, $S_{yx}\%$ de 24,44, AIC de 113,8409, BIC de 94,7167 e *dW* de 0,9865). Concluiu-se que apesar de apresentar valores relativamente baixos para $R^2_{aj.}$, o ajuste foi satisfatório tendo em vista a precisão expressa por $S_{yx}\%$ e pela equilibrada distribuição gráfica dos resíduos.

PALAVRAS-CHAVE: altura, critérios de informação, índice de concordância, reflorestamento, relação hipsométrica.

DBH-HEIGHT EQUATIONS FOR MIX-TREE SPECIES RESTORATION PLANTATIONS IN THE ATLANTIC RAIN FOREST, SEROPÉDICA-RJ, BRAZIL

ABSTRACT

The aim of this work was to adjust hypsometric equations for an environmental restoration stand composed of 79 native species of the Atlantic Rain Forest. Actual data of 179 trees whose heights were measured directly with a tape after felling were analyzed. The linear regression technique was used and ten different models for estimating total tree height from diameter at breast height were tested. The models were tested and adjusted equations were compared using the coefficient of determination adjusted ($R^2_{aj.}$), standard error of estimate in percentage ($S_{yx}\%$), Akaike information (AIC) and Bayesian (BIC) criteria and the Willmott concordance

index (dW). The results indicated that, based on the comparison among these parameters, the most appropriate model was Stofells (R^2_{aj} 0.6064, S_{yx} 24.44%, AIC 113.8409, BIC 94.7167 and dW 0.9865). It was concluded that despite relatively low values for R^2_{aj} , the adjustment was satisfactory in view of the precision expressed by S_{yx} and the balanced graphic residual distribution.

KEYWORDS: concordance index, height, hypsometric relation, information criteria, reforestation.

INTRODUÇÃO

O bioma Mata Atlântica e seus ecossistemas associados envolvem uma área de 1,1 milhão de km², o que representa 13% do território brasileiro. Em virtude de séculos de ocupação, a área florestal da Mata Atlântica foi reduzida drasticamente e encontra-se altamente fragmentada. Estima-se que os remanescentes florestais deste bioma totalizem 20.128.299 hectares, ou seja, 18,1% da área original (SFB, 2013).

Diante da intensa antropização sofrida pelo bioma houve um avanço expressivo das leis que disciplinam a ação humana sobre as florestas. Nos últimos anos houve grandes incentivos para plantios de espécies florestais nativas para a restauração florestal. Um exemplo de incentivo é a Lei nº 11.428 de 26 de dezembro de 2006, que no Art. 36 menciona a criação do Fundo de Restauração do Bioma Mata Atlântica para projetos de restauração ambiental e de pesquisa científica. Esse e outros incentivos têm criado demanda para geração de conhecimento técnico-científico e o repasse dessas informações à sociedade (BRASIL, 2006).

O esforço integrado de conservação e restauração da Mata Atlântica deve passar por uma padronização e atualização do conhecimento científico e empírico acumulado, incluindo uma contextualização temporal desse conhecimento e a sua tradução em ações específicas, sempre buscando o referencial teórico que sustentava a adoção dessas ações (RODRIGUES et al., 2009).

Para que se possa acompanhar o desenvolvimento de uma floresta em restauração é necessário planejar executar ações de monitoramento, as quais envolvem a realização de medições florestais, como o diâmetro e a altura das árvores. A medição das alturas de todas as árvores é uma atividade que encarece o inventário florestal por demandar um tempo extra, e está sujeita a muitos erros devido às dificuldades de campo. As equações hipsométricas são ferramentas utilizadas para estimar a altura de indivíduos a partir da relação existente entre altura e *dap*. Dessa forma, as equações hipsométricas são uma boa alternativa, pois a partir da medição de apenas algumas alturas por parcela pode-se estimar a altura de todas as árvores amostradas a partir da relação entre o diâmetro das árvores e suas respectivas alturas (SANQUETTA et al., 2014a).

Segundo MACHADO et al. (1993) citado por SOUSA et al. (2013), o uso de equações hipsométricas no inventário tem sido cada vez mais frequente, tornando-o mais econômico e, na maioria das vezes, tão preciso quanto ao realizado medindo-se a altura de todas as árvores da parcela.

Neste contexto, o presente estudo teve por objetivo testar dez modelos matemáticos para expressar a relação hipsométrica para árvores de plantios de restauração florestal da Mata Atlântica para 79 espécies florestais nativas e ajustar as respectivas equações, indicando a que melhor se comportou. A pesquisa visou prover equações que podem ser empregadas para estimar alturas totais simplesmente a partir do diâmetro à altura do peito das árvores (*dap*), facilitando o monitoramento dos plantios.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

Para este estudo foram utilizados dados de 179 árvores de 79 espécies nativas da Mata Atlântica advindas de plantios de restauração ambiental localizados no município de Seropédica, Estado do Rio de Janeiro. Os espaçamentos de plantio variaram de 1,5x1,5m, 2,0x1,5m, 2,0x2,0m e 3,0x2,0m e as idades das plantas variam de dois a seis anos (base 2008).

Coleta de dados

Tomaram-se o diâmetro à altura do peito (*dap*), o diâmetro médio de copa (*dm*), a altura total (*ht*) e a altura da maior ramificação da copa foram tomados (*hc*) nas árvores. As árvores foram derrubadas e medidas diretamente com uso de trena. Para este trabalho foram utilizadas apenas as variáveis *dap* e *ht*.

Modelos hipsométricos

No estudo em questão foram testados dez modelos hipsométricos cujas equações foram ajustadas pelo método de mínimos quadrados (Quadro 1). Foram utilizados como variável dependente a altura total (m) e como variável independente o *dap* (cm).

QUADRO 1 – Modelos testados para ajuste da relação hipsométrica em plantios de restauração florestal na Mata Atlântica, Seropédica-RJ.

Equação	Modelo	Autor(es)/Nomenclatura
1	$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot dap$	CAMPOS E LEITE (2002)
2	$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(dap)$	HENRICKSEN (1950)
3	$\ln h = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(dap)$	STOFFELS (1953)
4	$\ln h = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1/dap)$	CURTIS (1967)
5	$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot dap + \beta_2 \cdot dap^2$	TROREY (1932)
6	$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1/dap) + \beta_2 \cdot dap$	PROPOSTO 1
7	$1/h = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1/dap)$	INVERSO
8	$h-1,3 = dap^2 / (\beta_0 + \beta_1 \cdot (1/dap) + \beta_2 \cdot (dap^2))$	PRODAN 1
9	$dap^2/h = \beta_0 + \beta_1 \cdot (dap) + \beta_2 \cdot (dap^2)$	PRODAN 2
10	$h/dap = (\beta_0 + \beta_1 \cdot (dap) + \beta_2 \cdot (dap^2))$	PROPOSTO 2

Critérios estatísticos de avaliação dos modelos

As equações ajustadas foram avaliadas pelos seguintes critérios: Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2_{aj}), Erro Padrão da Estimativa em Percentagem ($S_{yx}\%$), Critérios de Informação de Akaike e Bayesiano e o Índice de Concordância de Willmott, além da análise gráfica dos resíduos, conforme descrito em SANQUETTA et al. (2014b).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ajustes das equações hipsométricas ajustadas estão expostos a seguir (Tabela 1).

TABELA 1 – Equações hipsométricas ajustadas e indicadores de qualidade de ajuste em plantios de restauração florestal na Mata Atlântica, Seropédica-RJ

Equação	Modelo	Coefficiente	$R^2_{aj.}$	$S_{yx}\%$	AIC	BIC	dW
1	Campos e Leite	β_0 3,353425	0,5945	25,26	125,27	106,42	0,8555
		β_1 0,404436					
2	Henricksen	β_0 0,885026	0,5995	25,10	123,08	104,23	0,8580
		β_1 3,043228					
3	Stoffels	β_0 0,886109	0,6202	24,44	113,57	94,72	0,9385
		β_1 0,495834					
4	Curtis	β_0 2,210437	0,5248	27,34	153,69	134,84	0,9456
		β_1 -2,24952					
5	Trorey	β_0 2,573873	0,6147	24,62	111,94	86,90	0,9585
		β_1 0,621573					
		β_2 -0,00972					
6	Proposto 1	β_0 4,994322	0,6200	24,45	109,45	84,41	0,8682
		β_1 0,307786					
		β_2 -4,55677					
7	Inverso	β_0 0,095149	0,5357	27,03	149,53	130,68	0,9417
		β_1 0,442891					
8	Prodan 1	β_0 1,273873	0,2970	33,26	219,60	194,56	0,8959
		β_1 0,621573					
		β_2 -0,00972					
9	Prodan 2	β_0 -1,6756	0,4265	30,04	183,15	158,11	0,9341
		β_1 1,123039					
		β_2 0,041505					
10	Proposto 2	β_0 2,573873	0,6125	24,69	111,94	86,90	0,8656
		β_1 0,621573					
		β_2 -0,00972					

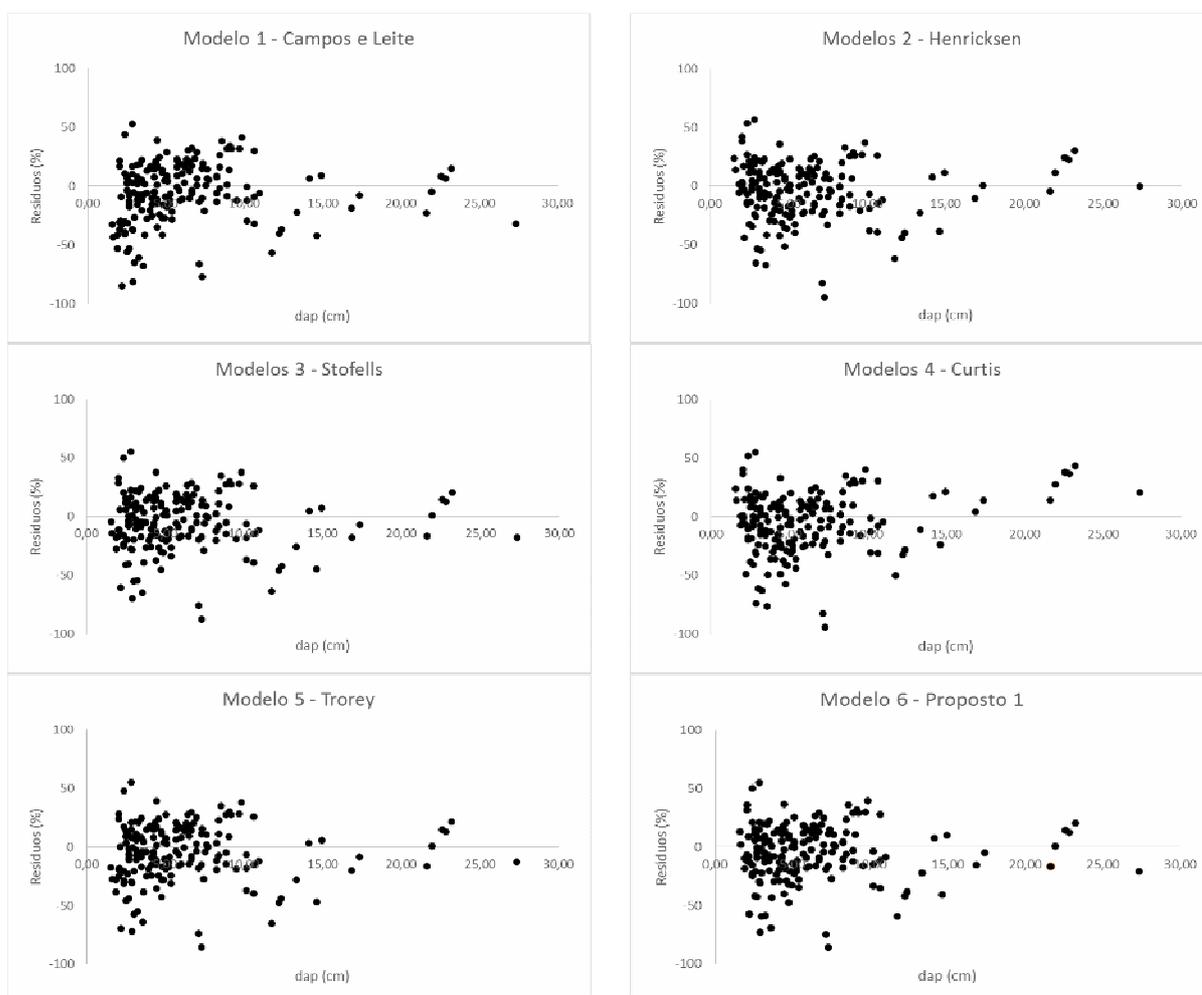
Os ajustes dos modelos testados foram considerados razoáveis se considerada a variabilidade em termos de espécies (79 ao todo), possuindo diferentes características e relações h/dap , que variaram de 0,40 a 3,29. Os valores de $R^2_{aj.}$ gravitaram entre 0,5 e 0,6 na sua maioria, com erros padrão relativo da ordem de 25 a 30%. Esses valores são comuns em relação hipsométrica para espécies nativas da Mata Atlântica, pois geralmente as morfometrias das distintas espécies repercutem em diferentes relações hipsométricas, o que implica na necessidade de estratificar os dados (SANQUETTA et al., 2013).

Segundo os critérios de qualidade de ajuste, o modelo que apresentou os resultados mais satisfatórios foi o Proposto 1, que teve o maior valor de $R^2_{aj.}$, o menor $S_{yx}\%$ e os menores valores de AIC e BIC. O modelo de Trorey foi o que apresentou maior valor de dW. Portanto, o modelo 6 foi selecionado como o melhor entre os testados.

O comportamento dos resíduos em percentagem da média da variável altura em função do dap foi semelhante para todos os modelos testados, conforme mostrado na Figura 1. Pelos gráficos foi possível evidenciar que os resíduos não

ultrapassaram 100% e ficaram concentrados próximos da linha ortogonal da regressão. Assim sendo, não foi detectado viés nas estimativas.

Modelos hipsométricos vêm sendo testados por vários autores na literatura, a maioria para espécies exóticas de rápido crescimento cultivadas para produção florestal. Para espécies nativas brasileiras não existe muita informação. Trabalhos relevantes a respeito foram realizados por AZEVEDO et al. (1999), MACHADO et al. (2008), SOARES et al. (2011), SANQUETTA et al. (2013), CURTO et al. (2014). Para plantios de restauração florestal as informações são ainda mais escassas. COSTA et al. (2006) publicaram um estudo sobre as equações hipsométricas em *Joannesia princeps* Vell. em plantio misto em Alegre-ES. Concluíram que o modelo de Stoffels foi o que teve melhor desempenho. NOGUEIRA JR. (2010) analisou o comportamento da relação $h-dap$ em plantios de restauração em Botucatu-SP. O autor estudou a relação hipsométrica em diferentes modelos de restauração e tipos de solos, porém sem ajustar equações hipsométricas. COSTA (2012) desenvolveu equações hipsométricas para plantios de jatobá, tendo obtido como melhor modelo $h = \beta_0 \cdot e^{\beta^*(1/dap)}$ sendo ajustado para cada macrorregião e municípios de abrangência do levantamento.



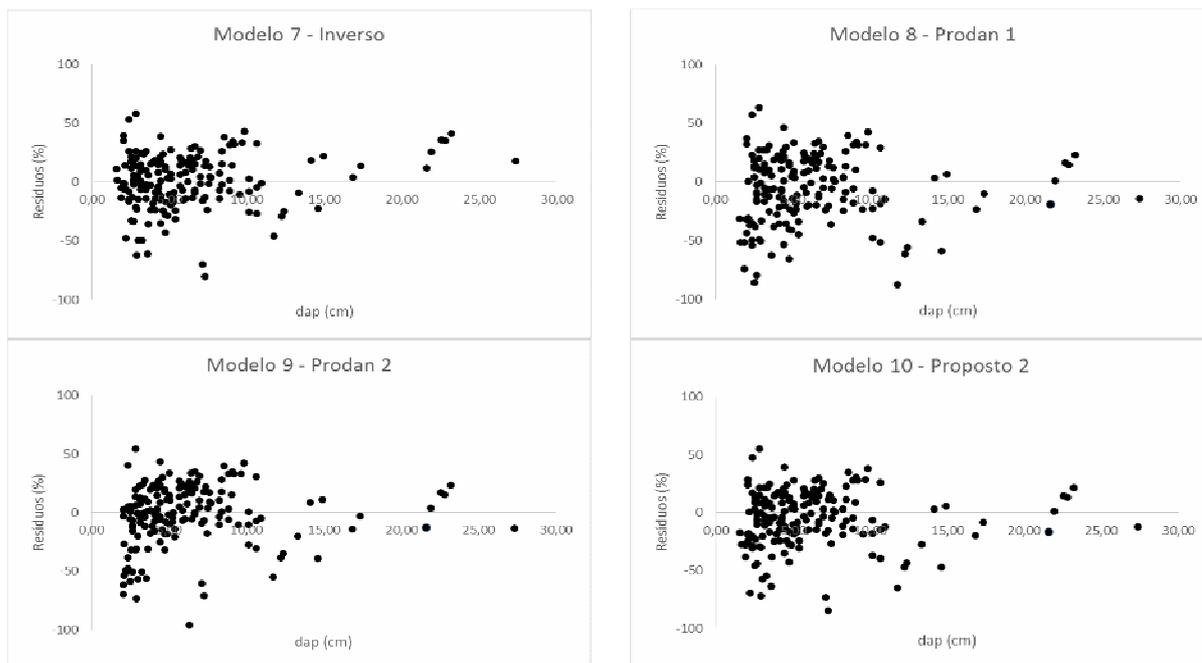


FIGURA 1 – Análise gráfica de resíduos de equações hipsométricas em plantios de restauração florestal na Mata Atlântica, Seropédica-RJ.

CONCLUSÃO

- Os modelos hipsométricos testados tiveram comportamentos apenas razoáveis, devido à alta dispersão dos valores de altura total em relação ao diâmetro à altura do peito, fato comprovado pelos valores dos indicadores de ajuste;
- Pela análise gráfica de resíduos não foram detectados vieses nas estimativas com todos os modelos testados. Assim, embora a precisão dos modelos não tenha sido excelente, a sua acurácia foi satisfatória;
- Pelos indicadores de ajuste, o modelo 6 – Proposto 1, foi o de melhor performance.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, C.P.; MUROYA, K.; GARCIA, L.C.; MOURA, J.B.; NECVES, E.J.M. Relação hipsométrica para quatro espécies florestais em plantio homogêneo e em diferentes idades na Amazônia ocidental. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 39, p.5-29, 1999.

BRASIL. **Lei Nº 11.428**, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. 2006. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11428.htm>. Acesso em: 20 out. 2014.

COSTA, M.P.; SOUZA, C.A.M.; ALMEIDA, A.Q.; NAPPO, M.E. Estudo da relação hipsométrica para a espécie *Joannesia princeps* Vell. estabelecida em plantio misto. **In: X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba**. p.1038-1041, 2006.

COSTA, C.B. **Prospecção e viabilidade econômica para o manejo sustentável de *Hymenaea* spp.** Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2012.130p.

CURTO, R. D. A.; LOUREIRO, G.H.; MÔRA, R.; MIRANDA, R.O.V.; PÉLLICO NETTO, S.; SILVA, G.F. Relações hipsométricas em Floresta Estacional Semidecidual. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 57, n. 1, p. 57-66, 2014.

MACHADO, S.A.; NASCIMENTO, R.G.M., AUGUSTYNCZIK, A.L.D; SILVA, L.C.R.; FIGURA, M.A.; MIGUEL, E.P.; TÊO, S.J. Comportamento da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* no capão da Engenharia Florestal da UFPR. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n.56, p.5-16, 2008.

NOGUEIRA JR., L. R. **Estoque de carbono na fitomassa e mudanças nos atributos do solo em diferentes modelos de restauração da Mata Atlântica.** Tese (Doutorado em Ciências - Conservação de Ecossistemas Florestais). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo 94p. 2010.

RODRIGUES, R.R.; BRANCALION, P.H.S.; ISERNHAGEN, I. **Pacto pela restauração da mata atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal.** São Paulo: LERF/ESALQ - Instituto BioAtlântica, 2009. 264p.

SANQUETTA, C.R.; DALLA CORTE, A.P.; ROGLIN, A. Relações diâmetro-altura para espécies lenhosas em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista no Sul do Paraná. **Iheringia**, v. 68, n.1, p.103-115. 2013.

SANQUETTA, C.R.; DALLA CORTE, A.P.; RODRIGUES, A.L.; WATZLAWICK, L.F. **Inventários Florestais: Planejamento e Execução.** Curitiba: Editoração dos Autores, 2014. 406p. (a)

SANQUETTA, C.R.; DALLA CORTE, A.P.; BEHLING, A.; PIVA, L.R.O.; SANQUETTA, M.N.I. Uso de critérios estatísticos de seleção de modelos alométricos para estimar biomassa individual de espécies. **In: Atualidades em Mensuração Florestal** (Dalla Corte, A.P. et al., editores). 398-402p. 2014.(b)

SFB – SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Florestas do Brasil em Resumo.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente: 2013. 186p.

SOARES, C.P.B; Martins, F.B.; LEITE JR, H.U.; SILVA, G.F.; FIGUEIREDO, L.T.M. Equações hipsométricas, volumétricas e de taper para onze espécies nativas. **Revista Árvore**, v.35, n5, p.1039-1051, 2011.

SOUSA, G. T. O.; AZEVEDO, G. B.; BARRETO, P. A. B.; JÚNIOR, V. C. Relações hipsométricas para *Eucalyptus urophylla* conduzidos sob regime de alto fuste e talhadia no Sudoeste da Bahia. **Scientia Plena**, v. 9, n. 4, 2013.