



CORRELAÇÕES E ANÁLISE DE TRILHA PARA BIOMASSA TOTAL ACIMA DO SOLO EM PLANTIOS DE *Eucalyptus benthamii*

Jonathan William Trautenmuller¹, Kauana Engel¹, Adriane Avelhaneda Mallmann¹,
Silvano Kruchelski¹, Sérgio Costa Júnior¹, Anibal de Moraes¹

1 Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil. E-mail: jwtraute@gmail.com;
kauanaeg@gmail.com; mallmann.adriane@gmail.com; silvanokr65@gmail.com;
osergiocosta@gmail.com CID:); anibalm@ufpr.br
Autor correspondente: Jonathan William Trautenmuller. E-mail: jwtraute@gmail.com.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi identificar os efeitos diretos e indiretos de caracteres dendrométricos e alométricos de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage em relação à biomassa total acima do solo. O estudo foi realizado em um experimento na fazenda da UFPR, com aproximadamente seis anos de idade. Foram mensuradas as variáveis: diâmetro à 1,3 m do solo (D), altura total (H), raio de copa (rc), volume com casca (V), volume sem casca (Vs), biomassa dos componentes galhos (Wg), folhas (Wf), madeira do fuste (Wm), casca do fuste (Wc) e a biomassa total acima do solo (Wt). Foram analisadas as correlações de Pearson. As correlações da Wt com as outras variáveis foram desmembradas por meio da análise de trilha, assim, sendo identificada a verdadeira influência das variáveis explicativas sobre a Wt. Todas as variáveis dendrométricas apresentaram correlações significativas e com magnitude acima de 0,61 com a Wt. A análise de trilha revelou que as variáveis Wm (0,20) e V (0,17) apresentam os maiores efeitos diretos sobre a Wt. O D (0,11) e a H (0,12) apresentaram efeitos diretos de menor magnitude quando comparado com o V. A inclusão do V pode aumentar as precisões das estimativas de Wt.

Palavras-chave: Análise de trilha; efeito direto; variáveis alométricas; variáveis dendrométricas

CORRELATIONS AND PATH ANALYSIS FOR TOTAL ABOVE-GROUND BIOMASS IN *Eucalyptus benthamii* PLANTS

ABSTRACT

The objective of this work was to identify the direct and indirect effects of dendrometric characters of *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage in relation to the total aboveground biomass. The study was carried out in an experiment at the UFPR farm, with approximately 6 years old. The following variables were measured: diameter at 1.3 m from the ground (D), total height (H), crown radius (rc), volume with bark (V), volume without bark (Vs), biomass of the branch components (Wg), leaves (Wf), stem wood (Wm), stem bark (Wc) and total aboveground biomass (Wt). Pearson correlations were analyzed. The Wt correlations with the other variables were broken down through path analysis, thus identifying the true influence of the explanatory variables on the Wt. All dendrometric variables showed significant correlations with a magnitude greater than 0.61 with bt. Path analysis revealed that the variables Wm (0.20) and V (0.17) had the greatest direct effects on Wt. The D (0.11) and H (0.12) showed direct effects of lesser magnitude when compared to V. The inclusion of V can increase the accuracies of the Wt estimates.

Key words: Path analysis; direct effect; allometric variables; dendrometric variables

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MENSURAÇÃO FLORESTAL



INTRODUÇÃO

A biomassa como fonte energética vem ganhando força e espaço político em um cenário que visa aproveitamento racional e integral dos recursos energéticos disponíveis (IBÁ, 2022). O *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage é uma espécie com múltiplos usos (Kruchelski *et al.*, 2021), entre eles a geração de energia, no qual pode ser empregada tanto a biomassa da copa como do fuste (Behling, 2016). Outra característica do *E. benthamii* é sua resistência à baixas temperaturas (Maier *et al.*, 2017), o que o torna interessante para a região Sul do Brasil.

Conhecer os efeitos diretos e indiretos de características dendrométricas e alométricas sobre a produção de biomassa, principalmente os que apresentam alta correlação com a variável de interesse, pode ser uma ferramenta poderosa para o melhoramento da espécie. Porém, estudos de correlação simples permitem estimar apenas a magnitude e o sentido das associações lineares entre duas variáveis e não consideram a associação de mais elementos (Salla *et al.*, 2015). Essas estimativas podem induzir a equívocos sobre a relação entre duas ou mais variáveis, que podem não representar uma medida real em virtude da possibilidade de haver relação com mais características (Cruz *et al.*, 2004).

A fim de entender melhor as causas envolvidas nas correlações entre variáveis, Wright (1921) propôs um método denominado de Análise de Trilha (*Path Analysis*), que desdobra as correlações em efeitos diretos e indiretos de variáveis explicativas sobre uma variável básica. Desta maneira, este trabalho teve como objetivo avaliar as correlações e seus desdobramentos em efeitos diretos e indiretos, pela Análise de Trilha, das variáveis dendrométricas sobre a biomassa total acima do solo em plantio experimental de *E. benthamii*.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização e caracterização da área de estudo

Este trabalho foi realizado na área experimental do Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA), em um plantio experimental de *Eucalyptus benthamii* de com aproximadamente 6 anos de idade. O povoamento se encontra no município de Pinhais, no estado do Paraná, com latitude sul de 25°23'30" e longitude oeste de 49°07'30", a uma altitude de 920 m.

A implantação do experimento obedeceu ao espaçamento de 3 m entre linhas por 2 m entre plantas na linha. O clima da região é Cfb, de acordo com a classificação da Köppen. A precipitação média anual varia de 1.600 mm a 1.900 mm, sem estação seca definida, e as temperaturas médias anuais variam de 16 °C a 18 °C, (Alvares *et al.*, 2013).

Coleta de dados

Foram amostradas 15 árvores de *E. benthamii*, divididas em cinco classes de diâmetro, tomando a árvore mais próxima ao diâmetro médio da classe. Todas as árvores após abatidas tiveram as seguintes variáveis avaliadas: diâmetro à 1,3 m do solo (D) em cm, altura total (H) em m, raio de copa (rc) em m, volume com casca (V) em m³, volume sem casca (Vs) em m³, biomassa

VI Encontro Brasileiro de Mensuração Florestal

dos componentes: galhos (Wg), folhas (Wf), madeira do fuste (Wm), casca do fuste (Wc) e a biomassa total acima do solo (Wt), todas as biomassas em kg. A biomassa foi quantificada a campo pelo método destrutivo, em que foram pesados separadamente o fuste, galhos e folhas.

No fuste foram retiradas amostras nas posições 0%, 50% e 95% em relação à altura total, nessas amostras foram efetuadas as proporções de casca e lenho para posterior conversão. Para os galhos e folhas foram retiradas amostras nos três terços da copa, amostrando a maior variabilidade de diâmetros dos galhos e estágios de desenvolvimento das folhas.

Em laboratório as amostras foram secadas em estufa de circulação e renovação de ar a temperatura de 65 ± 5 °C até peso constante. Em posse desses dados foram calculados os teores de umidade de cada amostra. Os pesos verdes coletados a campo foram convertidos para biomassa seca.

Análise de dados

Para cada variável foi efetuada a estimativa da correlação de Pearson, sendo realizado o desdobramento das correlações em efeitos diretos e indiretos das variáveis dendrométricas e alométricas sobre a biomassa total acima do solo, por meio de Análise de Trilha, como descrita por Cruz *et al.* (2004). O nível de multicolinearidade da matriz singular $X'X$ foi estabelecido nos valores do determinante e do número de condição (NC = razão entre o maior e o menor autovalor) dessas matrizes.

Para atenuar o efeito da variância muito alta, o sistema de equações normais foi modificado, pela adição de uma constante k aos valores dos elementos da diagonal da matriz de acordo com Hoerl & Kennard (1970). Carvalho *et al.* (1999) ressaltam que deve ser escolhido um valor de k para o qual a maioria dos coeficientes de trilha esteja estabilizada.

O valor do coeficiente foi estabelecido por meio de gráficos, nos quais foram plotados os valores dos efeitos diretos das características em função dos valores de k (Cruz *et al.*, 2004). Todas as análises foram realizadas utilizando o pacote *metan* (Olivoto & Lúcio, 2020) no *software* R (R Core Team, 2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as variáveis dendrométricas apresentaram correlações significativas com a bt (Figura 1), com magnitude superior a 0,6000. A maior correlação correspondeu com o V (0,9964) e a Wm (0,9975), essas tendo uma associação próxima a perfeita, a menor correlação foi com a variável r_c (0,6085), sendo significativo à 5%. Com essa análise fica claro que o D ($\hat{\rho} = 0,9688$) apresentou grande associação com a Wt, indicando que sua utilização em modelos alométricos para plantios com *Eucalyptus benthamii* deveria retornar boas estatísticas de ajuste. Trautenmüller *et al.* (2019), encontraram correlações com magnitudes acima de 0,71 e significativas a 1% de probabilidade de erro entre as variáveis D, H e componentes de biomassa com a Wt, estudando a biomassa acima do solo em florestas naturais do Sul do Brasil.

VI Encontro Brasileiro de Mensuração Florestal

Para melhor entender as inter-relações entre as variáveis foi realizado o desmembramento das correlações por meio da Análise de Trilha (Tabela 1). As magnitudes dos efeitos diretos variaram de -0,02 (rc) à 0,20 (Wm), evidenciando que a utilização das correlações de Pearson de forma direta pode não retratar as verdadeiras associações (Trautenmüller *et al.*, 2019). Os efeitos diretos em magnitude foram: Wm (0,20), V (0,17), Wg (0,16), Wc (0,16) e Vs (0,16), sendo as outras variáveis com efeito direto menor que a variável residual.

Nos casos que o efeito direto foi menor que a efeito da variável residual, essas variáveis não apresentam efeito direto de magnitude significativos. A análise de trilha indica que as variáveis alométricas (Wm, Wg e Wc) e as volumétricas (V e Vs) apresentam maiores associações diretas sobre a Wt, indicando que sua utilização na montagem dos modelos alométricos podem propiciar equações com melhores estatísticas de ajuste.

D	H	rc	V	Vs	Wg	Wf	Wm	Wc	Wt	
	0.7102**	0.6085*	0.9614***	0.9602***	0.9082***	0.8438***	0.9564***	0.9232***	0.9688***	D
		0.6944**	0.8097***	0.7945***	0.5077	0.3282	0.8375***	0.8340***	0.8028***	H
			0.6222*	0.6032*	0.4678	0.2859	0.6176*	0.6618**	0.6085*	rc
				0.9971***	0.8981***	0.7208**	0.9952***	0.9580***	0.9964***	V
					0.9007***	0.7385**	0.9906***	0.9440***	0.9924***	Vs
						0.8526***	0.8745***	0.8034***	0.9037***	Wg
							0.7109**	0.6054*	0.7469**	Wf
								0.9618***	0.9975***	Wm
									0.9593***	Wc
										Wt

Figura 1. Estimativa dos coeficientes da Correlação de Pearson entre as variáveis dendrométricas e alométricas avaliadas em plantio experimental de *Eucalyptus benthamii* em espaçamento de 3x2 m. Em que: D é o diâmetro a 1,3 m do solo; H é a altura total; rc é o raio de copa; V é o volume com casca; Vs é o volume sem casca; Wg é a biomassa de galhos; Wf é a biomassa de folhas; Wm é a biomassa da madeira do fuste; Wc é a biomassa da casca do fuste; Wt é a biomassa total acima do solo; * indica significância estatística a nível de 5% de probabilidade de erro; ** indica significância estatística a nível de 1% de probabilidade de erro; *** indica significância estatística a nível de 0,1% de probabilidade de erro

VI Encontro Brasileiro de Mensuração Florestal

Tabela 1. Estimativa dos efeitos diretos e indiretos em características dendrométricas sobre a biomassa total

Efeitos	Caracteres explicativos								
	D	H	rc	V	Vs	Wbg	Wf	Wm	Wc
Direto	0,11	0,12	-0,02	0,17	0,16	0,16	0,06	0,20	0,16
Indireto via D	-	0,07	0,06	0,10	0,10	0,09	0,09	0,10	0,09
Indireto via H	0,08	-	0,08	0,09	0,10	0,06	0,04	0,09	0,10
Indireto via rc	-0,01	-0,01	-	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
Indireto via V	0,16	0,13	0,10	-	0,15	0,14	0,11	0,15	0,15
Indireto via Vs	0,14	0,12	0,09	0,15	-	0,13	0,11	0,15	0,14
Indireto via Wg	0,13	0,07	0,07	0,13	0,13	-	0,13	0,13	0,12
Indireto via Wf	0,05	0,02	0,02	0,04	0,04	0,05	-	0,04	0,03
Indireto via Wm	0,18	0,16	0,11	0,18	0,18	0,16	0,13	-	0,18
Indireto via Wc	0,13	0,12	0,10	0,14	0,14	0,12	0,09	0,14	-
Total (r)	0,97	0,80	0,61	0,99	0,99	0,90	0,75	0,99	0,96
Valor de <i>k</i>					0,09				
Efeito da variável residual					0,13				
Número de condições					81,61				

Em que: D é o diâmetro a 1,3 m do solo; H é a altura total; rc é o raio de copa; V é o volume com casca; Vs é o volume sem casca; Wg é a biomassa de galhos; Wf é a biomassa de folhas; Wm é a biomassa da madeira do fuste; Wc é a biomassa da casca do fuste; Wt é a biomassa total acima do solo; *k* é a constante inserida na diagonal principal da matriz X'X

Após a correção da multicolinearidade pela inclusão do fator *k* (0,09), o número de condição (81,61) evidenciou a presença de baixa colinearidade entre as variáveis explicativas. Montgomery *et al.* (2012) mencionam que o número de condição abaixo de 100 representa baixa multicolinearidade entre as variáveis explicativas. Trautenmüller *et al.* (2019), em seus estudos com florestas naturais no sul do Brasil, encontraram que apenas as variáveis biomassa do fuste (0,45), biomassa dos galhos (0,36) e o D (0,17) obtiveram efeitos diretos maiores que o efeito da variável residual (0,16). Isto demonstra que a inclusão de outras variáveis dendrométricas podem melhorar as estatísticas de ajuste e os intervalos de confiança nos estimadores de biomassa total acima do solo, tanto para florestas plantadas como naturais. Novos estudos de correlações e associações com o desmembramento por meio da análise de trilha devem ser realizados, principalmente com a coleta de novas variáveis (biométricas e edafoclimáticas). Com isto, identificar quais são as variáveis que apresentam os verdadeiros efeitos sobre a variável de interesse, neste caso a biomassa total acima do solo.

CONCLUSÃO

A correlação simples de Pearson indica que qualquer variável pode ser incluída na modelagem da biomassa total acima do solo. As variáveis dendrométricas D e H geralmente apresentam correlações simples de grande magnitude com a biomassa total acima do solo, mas seus efeitos diretos são inexpressivos para explicar a biomassa total. A inclusão de ao menos uma variável volumétrica (V ou Vs) ou alométrica (Wm, Wg ou Wc), poderá aumentar as precisões dos estimadores de biomassa total acima do solo para plantios com *Eucalyptus benthamii*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, n.6, p.711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

VI Encontro Brasileiro de Mensuração Florestal

- Behling, A. **Modelagem da biomassa de árvores para assegurar aditividade dos seus componentes**. 2016. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/45424>. Acesso em: 19 Mar. 2023.
- Carvalho, C. G. P.; Oliveira, V. R.; Cruz, C. D.; Casali, V. W.D. Análise de trilha sob multicolinearidade em pimentão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.4, p.603-613, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000400011>.
- Cruz, C.D.; Regazzi, A.J.; Carneiro, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3.ed. Viçosa: UFV, 2004. 480p.
- Hoerl, A.E.; Kennard, R.W. Ridge regression: applications to Non orthogonal problems. *Technometrics*, v.12, n.1, 69-82 p, 1970. <https://doi.org/10.1080/00401706.1970.10488635>.
- Industria Brasileira de Árvores - IBÁ. **Relatório anual**. São Paulo: Industria Brasileira de Árvores, 2022. 87p.
- Kruchelski, S.; Trautenmüller, J.W.; Deiss, L.; Trevisan, R.; Cabbage, F.; Porfírio-Da-Silva, V.; Moraes, A. *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage growth and wood density in integrated crop-livestock systems. **Agroforest Systems**, v.95, p.1577-1588, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00672-0>.
- Maier, C.A.; Albaugh, T.J.; Cook, R.L.; Hall, K.; Mcinnis, D.; Johnsen, K.H.; Johnson, J.; Rubilar, R.A.; Vose, J.M. Comparative water use in short-rotation *Eucalyptus benthamii* and *Pinus taeda* trees in the Southern United States. **Forest Ecology and Management**, v.397, p.126-138, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.038>.
- Montgomery, D. C.; Peck, E. A.; Vining, G. G. **Introduction to linear regression analysis**. Hoboken: Wiley, 2012. 504 p.
- Olivoto T, Lúcio AD. metan: An R package for multi-environment trial analysis. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 11, n. 6, p.783-789, 2020. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13384>.
- R Core Team. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 17 Fev. 2023.
- Salla, V. P.; Danner, M. A.; Citadin, I.; Sasso, S. A. Z.; Donazzolo, J.; Gil, B. V. Análise de trilha em caracteres de frutos de jaboticabeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.3, p.218-223, 2015. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000300005>.
- Trautenmüller, J.W.; Péllico Netto, S.; Balbinot, R.; Dalla Corte, A.P.; Borella, J. Path analysis applied to evaluation of biomass estimates in subtropical forests of Brazil. **Floresta**, v. 49, n. 3, p. 587 -596, 2019. <https://doi.org/10.5380/RF.V49I3.60782>.
- Wright, S. Correlation and causation. **Journal of Agricultural Research**, v. 20, n.3, p.557-585, 1921.