

Dimensionamento amostral e associação linear entre caracteres de *Crotalaria spectabilis*

Sample size and linear relationships between *Crotalaria spectabilis* traits

Marcos Toebe*, Cirineu Tolfo Bandeira, Sabrina Kitina Giordano Fortes, Juliana Oliveira de Carvalho, Francieli de Lima Tartaglia, André Limana Tambara, Patricia Jesus de Melo

Universidade Federal do Pampa - Agronomia - Itaqui (RS), Brasil.

RESUMO: Os objetivos deste trabalho foram determinar o tamanho de amostra necessário para a estimação da média de caracteres e avaliar as relações lineares existentes entre caracteres de plantas de *Crotalaria spectabilis*. Foi conduzido um experimento com *C. spectabilis* na safra 2014/2015, sendo os seguintes caracteres avaliados em 100 plantas: altura da planta (AP), número de ramos produtivos (NRP), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de vagens (MSVG), número de vagens (NVG), peso médio de cada vagem (PMVG), número de sementes (NS), número médio de sementes por vagem (NSVG), massa de cem grãos (MCG) e peso total de sementes (PTS). Foram calculadas medidas de tendência central, de dispersão e de distribuição, foi verificada a normalidade dos dados e determinado o tamanho de amostra necessário para a estimação da média de cada caractere, assumindo-se erros de estimação iguais a 1, 2, ..., 20% da média. Depois, foram calculados os coeficientes de correlação linear de Pearson e estimados os efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas sobre PTS por meio de análise de trilha. Em *C. spectabilis*, são necessárias 121 plantas para estimação da média dos caracteres NRP, MSPA, MSVG, NVG, NS e PTS com erro máximo de 10% da média. Já para a estimação da média de AP, PMVG, NSVG e MCG nesse mesmo nível de precisão, são necessárias 6 plantas. A variável NS apresentou elevada correlação e efeito direto sobre PTS, indicando relação de causa e efeito e possibilidade de seleção indireta. As demais variáveis explicativas apresentaram efeitos indiretos sobre PTS via NS.

Palavras-chave: precisão experimental, planejamento experimental, análise de trilha, seleção indireta.

ABSTRACT: The aims of this research were to determine the sample size needed to estimate the mean of traits and evaluate the linear relationships between traits of *Crotalaria spectabilis* plants. An experiment with *C. spectabilis* was conducted in the 2014/2015 season, and the following characters were evaluated in 100 plants: plant height (AP), number of productive branches (NRP), dry matter of the aerial part (MSPA), dry matter of the pods (MSVG), number of pods (NVG), weight of each pod (PMVG), number of seeds (NS), average number of seeds per pod (NSVG), mass of hundred grains (MCG), and total weight of seeds (PTS). Measures of central tendency, dispersion and distribution were calculated, the normality of the data was checked, and the sample size needed to estimate the mean of each trait was determined, assuming estimation errors equal to 1, 2, ..., 20% of the mean. Then, the Pearson's linear correlation coefficients were calculated, and the direct and indirect effects of the explanatory variables on PTS were estimated by path analysis. In *C. spectabilis*, 121 plants are required to the mean estimation of NRP, MSPA, MSVG, NVG, NS, and PTS traits, with a maximum estimation error of 10% of the mean. In this same level of accuracy, 6 plants are needed for the estimation of the mean of AP, PMVG, NSVG, and MCG. The variable NS showed high correlation and direct effect on PTS, indicating a relation of cause and effect and the possibility of indirect selection. The other explanatory variables had indirect effects on PTS via NS.

Key words: experimental precision, experimental planning, path analysis, indirect selection.

*Corresponding author: m.toebe@gmail.com

Recebido: 20 Dez. 2015 – Aceito: 7 Jun. 2016

INTRODUÇÃO

A *Crotalaria spectabilis* Roth pertence à família *Fabaceae* e juntamente com as demais espécies do gênero *Crotalaria* são popularmente conhecidas como crotalária, guizo ou chocalho de cascavel, sendo utilizadas como cultura de cobertura ou de adubação verde (Albuquerque et al. 2000; Leal et al. 2012). As espécies de crotalária apresentam elevada capacidade de produção de biomassa e fixação de nitrogênio (Teodoro et al. 2011, 2015). Ainda, de acordo com Araújo et al. (2015), a cobertura morta com resíduos culturais de *C. spectabilis* apresenta interferência na dinâmica populacional da tiririca (*Cyperus rotundus*), com redução do número e da fitomassa seca dessa planta daninha. Contudo, atualmente, existem poucas informações na literatura sobre a importância da *C. spectabilis*, o que intensifica a necessidade de pesquisas sobre a cultura.

Para se obterem resultados confiáveis em pesquisas envolvendo a *C. spectabilis* e demais culturas agrícolas, é indispensável o correto dimensionamento do tamanho da amostra (número de plantas) que deverá ser utilizado. Nesse sentido, Bussab e Morettin (2011) destacam que o tamanho de amostra é inversamente proporcional ao erro permitido *a priori* pelo pesquisador, sendo maior de acordo com o aumento da variabilidade dos dados e da confiabilidade desejada. Estudos de dimensionamento amostral já foram realizados para a avaliação de caracteres em plantas de cobertura como *Crambe abyssinica* (Cargnelutti Filho et al. 2010), nabo forrageiro (Cargnelutti Filho et al. 2014), tremoço branco (Burin et al. 2014) e aveia preta (Cargnelutti Filho et al. 2015). Em *Crotalaria juncea* e *Crotalaria spectabilis*, foram determinados tamanhos de amostra para a estimação da média de massas fresca e seca e da produtividade (Teodoro et al. 2015).

Por sua vez, o estudo das associações entre caracteres é importante em programas de melhoramento pela possibilidade da seleção indireta de plantas com maior produção de massa, de grãos ou nos casos em que a variável de interesse é de difícil mensuração (Cruz e Regazzi 1997). Para o estudo da associação entre pares de caracteres, pode-se utilizar o coeficiente de correlação linear de Pearson (r), que assume valores no intervalo de $-1 \leq r \leq 1$ (Ferreira 2009). Segundo o autor, o coeficiente de correlação mede a força e a direção da associação, podendo esta ser positiva, negativa, ou, ainda, existir ausência de relacionamento linear entre pares de variáveis.

Quando um conjunto de variáveis (caracteres) é avaliado simultaneamente, a quantificação e a interpretação da magnitude de correlações específicas podem resultar em inferências equivocadas, devido a efeitos de outras variáveis não consideradas na correlação (Cruz e Regazzi 1997). Assim, a análise de trilha é uma técnica multivariada importante, que permite o desdobramento dos coeficientes de correlação em efeitos diretos e indiretos sobre a variável principal (Wright 1921, 1923, 1934). Essa técnica pode contribuir para a verificação das relações de causa e efeito de caracteres explicativos sobre a variável principal, indicando quais caracteres podem ser utilizados na seleção indireta (Cruz e Regazzi 1997; Cruz e Carneiro 2006). Estudos de relações lineares por meio de correlações e análise de trilha já foram desenvolvidos em culturas de cobertura e de produção de grãos, como em crambe (Cargnelutti Filho et al. 2010).

Diante do exposto, os objetivos deste trabalho foram determinar o tamanho de amostra necessário para a estimação da média e avaliar as relações lineares existentes entre caracteres de plantas de *Crotalaria spectabilis*.

MATERIAL E MÉTODOS

Foi conduzido um experimento (ensaio de uniformidade) com *Crotalaria spectabilis* na safra 2014/2015, em área experimental da Universidade Federal do Pampa, campus Itaqui, situada no município de Itaqui, Estado do Rio Grande do Sul, nas coordenadas geográficas lat 29°09'S e long 56°33'W e altitude de 74 m. Pela classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cfa, subtropical úmido, com verões quentes e sem estação seca definida, sendo o solo classificado como Plintossolo Háplico (Embrapa 2013). A semeadura foi realizada em linha, no dia 16/10/2014, utilizando-se 33 sementes por metro linear e espaçamento entre linhas de 0,45 m, num ensaio de 8,1 m de comprimento \times 8,1 m de largura (65,61 m²). A adubação de base foi de 25 kg·ha⁻¹ de N, 100 kg·ha⁻¹ de P₂O₅ e 100 kg·ha⁻¹ de K₂O. Todos os tratamentos culturais foram realizados de modo uniforme dentro da área amostral, também considerada como sendo experimento em branco sem tratamentos, conforme descrito por Storck et al. (2011).

Em 100 plantas aleatoriamente identificadas dentro do ensaio, foram realizadas 2 avaliações (colheitas), sendo a primeira realizada no dia 18/05/2015 (214 dias após a semeadura — DAS) e a segunda realizada no dia 02/06/2015

(229 DAS), em função da deiscência das vagens. Em cada planta avaliada, foram mensurados os seguintes caracteres: altura da planta (AP, em cm, avaliada aos 229 DAS), número de ramos produtivos (NRP, em unidades, avaliado aos 229 DAS), massa seca da parte aérea (MSPA, em g, corresponde à massa seca da parte aérea sem vagens após a colheita aos 229 DAS adicionada da massa seca de vagens obtida pela soma das avaliações após as colheitas aos 214 e 229 DAS), massa seca de vagens (MSVG, em g, soma das avaliações após as colheitas aos 214 e 229 DAS), número de vagens (NVG, em unidades — soma das avaliações aos 214 e 229 DAS), peso médio de cada vagem (PMVG, em g, obtido pela divisão MSVG/NVG), número de sementes (NS, em unidades, soma das avaliações aos 214 e 229 DAS), número médio de sementes por vagem (NSVG, em unidades, obtido pela divisão NS/NV), peso total de sementes (PTS, em g, soma das avaliações após as colheitas aos 214 e 229 DAS) e massa de 100 grãos (MCG, em g, obtida pela relação $100 \times \text{PTS}/\text{NS}$).

Para cada caractere mensurado, foram calculados os valores mínimo e máximo, média, mediana, variância, desvio padrão, erro padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria e o p-valor do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (Massey 1951). Após, foi determinado o tamanho de amostra necessário para a estimação da média de cada caractere, assumindo-se erros de estimação (em % da média) iguais a 1, 2, ..., 20% da estimativa da média, com grau de confiança $(1 - \alpha)$ de 95%. Para isso, utilizou-se a equação (Bussab e Morettin 2011):

$$\eta = (t_{\alpha/2}^2 s^2)/(\text{erro de estimação})^2$$

onde: $t_{\alpha/2}$ é o valor crítico da distribuição *t* de Student, cuja área à direita é igual a $\alpha/2$, com $(\eta - 1)$ graus de liberdade; $\alpha = 5\%$ de probabilidade de erro; s^2 representa a estimativa da variância.

A seguir, fixou-se η em 100 plantas (número de plantas avaliadas), e foi calculado o erro de estimação em percentagem da estimativa da média (\bar{X}) para cada caractere considerando-se o total de plantas avaliadas, por meio da equação:

$$\text{erro de estimação} = 100 \frac{t_{\alpha/2} s}{\sqrt{\eta} \bar{X}}$$

onde: s é a estimativa do desvio padrão.

Após a determinação do tamanho de amostra, foram construídos histogramas de frequência e gráficos de dispersão entre os 10 caracteres avaliados. Foi calculada a matriz de coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre os caracteres, sendo a significância dos coeficientes verificada por meio do teste *t* de Student, a 5% de probabilidade de erro, conforme descrito por Ferreira (2009). A seguir, foi realizado o diagnóstico de multicolinearidade na matriz $X'X$, que representa a matriz de correlação entre os 9 caracteres explicativos (AP, NRP, MSPA, MSVG, NVG, PMVG, NS, NSVG e MCG), conforme critérios estabelecidos por Montgomery e Peck (1982). Assim, se o número de condição (NC) obtido pela razão entre o maior e o menor autovalor da matriz de correlação $X'X$ foi $\text{NC} \leq 100$, considerou-se multicolinearidade fraca entre os caracteres explicativos; $100 < \text{NC} < 1.000$, multicolinearidade moderada a severa; e $\text{NC} \geq 1.000$, multicolinearidade severa. No caso de multicolinearidade severa, procedeu-se à eliminação de caracteres explicativos altamente correlacionados, conforme recomendações de Cruz e Carneiro (2006).

Em seguida, foi realizada a análise de trilha de PTS em função dos caracteres explicativos, em único diagrama causal, conforme metodologia proposta por Wright (1921, 1923, 1934) e descrita por Cruz e Carneiro (2006) e Cruz e Regazzi (1997), utilizando-se, para isso, o sistema de equações normais:

$$X'X \hat{\beta} = X'Y$$

onde: $X'X$ representa a matriz de correlação entre caracteres explicativos; $X'Y$ representa o vetor de correlações de cada caractere explicativo com PTS; $\hat{\beta}$ é o estimador dos efeitos diretos dos caracteres explicativos sobre PTS.

As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do programa GENES (Cruz 2013) e do Microsoft® Office Excel.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de média e mediana foram similares entre si para os caracteres AP, PMVG, NSVG e MCG (Tabela 1). Já os caracteres NRP, MSPA, MSVG, NVG, NS e PTS apresentaram valores maiores de médias em relação às medianas, indicando padrão assimétrico positivo. Isso se deve ao fato de que algumas das 100 plantas avaliadas apresentaram elevados escores desses caracteres (Figura 1)

Tabela 1. Valores mínimo e máximo, média, mediana, variância, desvio padrão, erro padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria e valor de p do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov para os caracteres: altura da planta, número de ramos produtivos, massa seca da parte aérea, massa seca de vagens, número de vagens, peso médio de cada vagem, número de sementes, número médio de sementes por vagem, massa de cem grãos e peso total de sementes, avaliados em 100 plantas de *Crotalaria spectabilis*.

Estatística	Caractere (unidade de medida)				
	AP (cm)	NRP (un.)	MSPA (g)	MSVG (g)	NVG (un.)
Mínimo	60,600	1,000	5,323	0,393	1,000
Máximo	120,000	4,000	81,763	36,993	99,000
Média	90,449	1,540	27,317	11,440	29,960
Mediana	91,250	1,000	24,375	9,800	25,500
Variância	122,684	0,615	157,528	38,762	261,433
Desvio padrão	11,076	0,784	12,551	6,226	16,169
Erro padrão	1,108	0,078	1,255	0,623	1,617
CV (%)	12,246	50,905	45,946	54,422	53,968
Curtose ¹	0,260 ^{ns}	1,373*	3,231*	4,149*	3,660*
Assimetria ²	-0,027 ^{ns}	1,405*	1,411*	1,555*	1,465*
Valor de p	0,840	0,000	0,096	0,036	0,020

Estatística	PMVG (g)	NS (un.)	NSVG (un.)	MCG (g)	PTS (g)
Mínimo	0,305	12,000	11,170	1,267	0,225
Máximo	0,482	1.872,000	23,773	2,033	30,667
Média	0,382	522,160	17,478	1,652	8,591
Mediana	0,379	465,500	17,653	1,649	7,904
Variância	0,002	83.839,408	4,599	0,017	22,473
Desvio padrão	0,039	289,550	2,145	0,129	4,741
Erro padrão	0,004	28,955	0,214	0,013	0,474
CV (%)	10,233	55,452	12,271	7,819	55,182
Curtose	-0,140*	5,741*	1,028*	1,242*	6,035*
Assimetria	0,333*	1,825*	-0,399 ^{ns}	0,129 ^{ns}	1,823*
Valor de p	0,888	0,098	0,368	0,437	0,072

¹*Curtose difere de zero, pelo teste t, em nível de 5% de probabilidade; ^{ns}Não significativo; ²*Assimetria difere de zero, pelo teste t, em nível de 5% de probabilidade. AP = Altura da planta; NRP = Número de ramos produtivos; MSPA = Massa seca da parte aérea; MSVG = Massa seca de vagens; NVG = Número de vagens; PMVG = Peso médio de cada vagem; NS = Número de sementes; NSVG = Número médio de sementes por vagem; MCG = Massa de cem grãos; PTS = Peso total de sementes.

e, por consequência, contribuíram para o deslocamento assimétrico à direita (Bussab e Morettin 2011). Além disso, em 8 dos 10 caracteres avaliados, houve comportamento leptocúrtico, indicando maiores concentrações de plantas na região central da distribuição dos dados e menor número de plantas nas extremidades.

A média de produção de massa seca de parte aérea (27,317 g.planta⁻¹ — Tabela 1) foi inferior à média obtida por Teodoro et al. (2015), de 61,24 g.planta⁻¹. O peso total de sementes (produtividade) no presente estudo foi de 8,591 g.planta⁻¹, sendo que Teodoro et al. (2015) obtiveram valores médios de 4,45 g.planta⁻¹. Destaca-se que o número

de plantas avaliadas no estudo desenvolvido por Teodoro et al. (2015) foi inferior (n = 45 plantas), a densidade de semeadura foi cerca de 50% inferior, sem utilização de fertilizantes, e as condições ambiental e de solo foram distintas, podendo contribuir com as diferenças verificadas em relação às produções de massa seca e de sementes.

Os desvios de assimetria e de curtose contribuíram para o afastamento da distribuição normal ($p \leq 0,036$) dos caracteres NRP, MSVG e NVG (Tabela 1). Os demais caracteres apresentaram bom ajuste à distribuição normal ($p \geq 0,072$), mesmo apresentando afastamentos de assimetria e curtose. Em relação à variabilidade dos dados, verificou-se que os

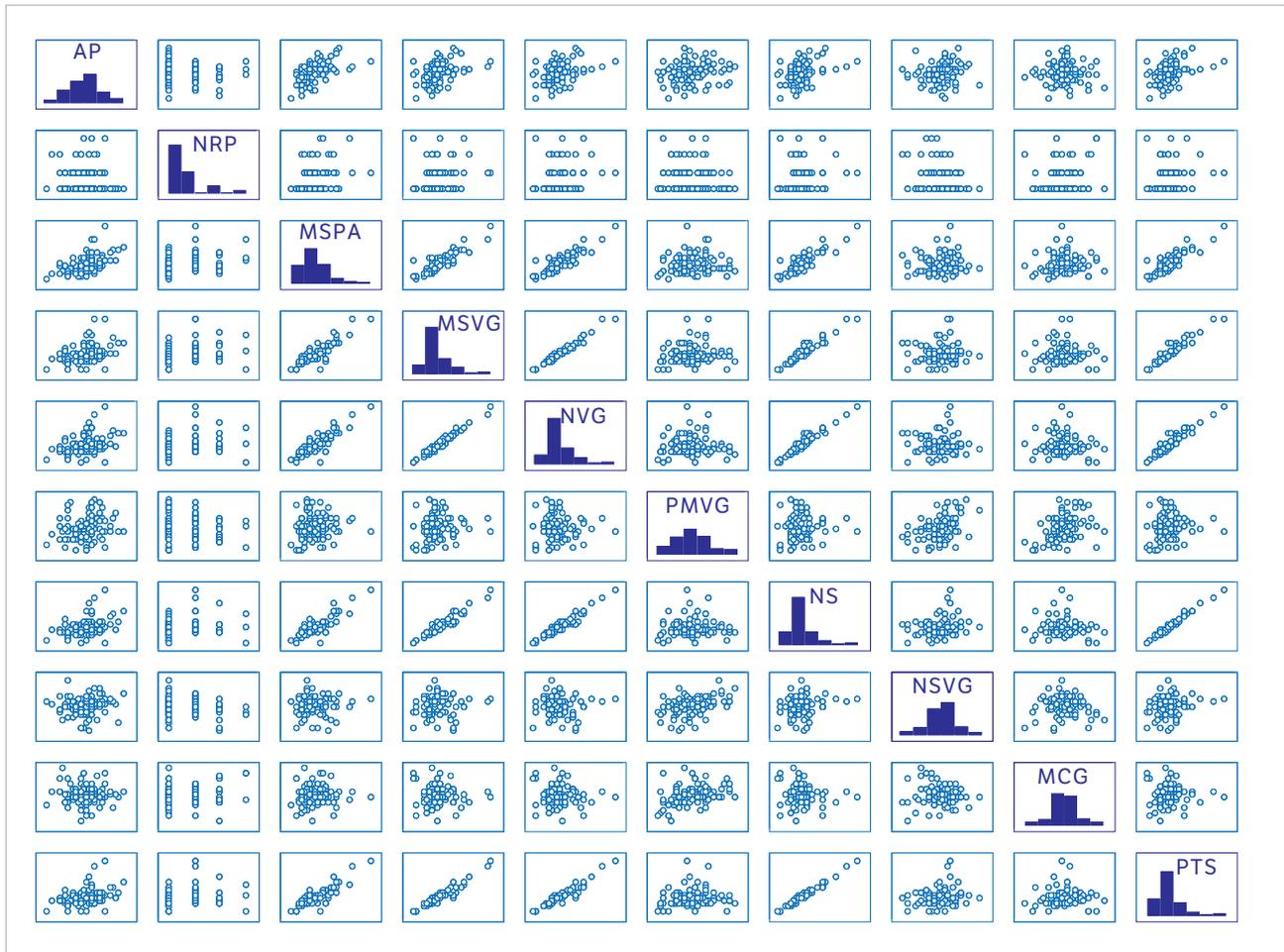


Figura 1. Representação gráfica da distribuição de frequência (na diagonal) e das relações entre os caracteres altura da planta (AP), número de ramos produtivos (NRP), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de vagens (MSVG), número de vagens (NVG), peso médio de cada vagem (PMVG), número de sementes (NS), número médio de sementes por vagem (NSVG), massa de cem grãos (MCG) e peso total de sementes (PTS) avaliados em 100 plantas de *Crotalaria spectabilis*.

caracteres AP, PMVG, NSVG e MCG, que apresentaram valores próximos de médias e medianas e melhor ajuste à distribuição normal ($p \geq 0,368$), apresentaram menor coeficiente de variação ($7,819\% \leq CV \leq 12,271\%$). Os demais caracteres (NRP, MSPA, MSVG, NVG, NS e PTS) apresentaram comportamento assimétrico positivo, o que pode ter contribuído para o aumento da variabilidade ($45,946\% \leq CV \leq 55,452\%$). Com base nos valores de coeficientes de variação e de distribuição dos dados, espera-se a necessidade de maior tamanho de amostra (número de plantas) para a avaliação de NRP, MSPA, MSVG, NVG, NS e PTS em relação ao requerido para a avaliação de AP, PMVG, NSVG e MCG.

O tamanho de amostra para estimação da média de cada caractere, com semi-amplitude do intervalo de confiança igual a 1% da estimativa da média e grau de confiança de 95%,

oscilou entre 241 e 12.107 plantas, respectivamente, para a estimação da média de MCG e do NS (Tabela 2). Ainda nesse mesmo nível de precisão, menor tamanho de amostra foi necessário para a mensuração de AP, PMVG, NSVG e MCG (número de plantas ≤ 593), e maior tamanho de amostra foi necessário para a mensuração de NRP, MSPA, MSVG, NVG, NS e PTS (número de plantas ≥ 8.311). Esses resultados estão de acordo com a maior variabilidade constatada para NRP, MSPA, MSVG, NVG, NS e PTS (Tabela 1). Segundo Teodoro et al. (2015), para a avaliação das massas fresca e seca e produção de grãos de *C. Juncea* e *C. Spectabilis* nesse nível de precisão, são necessárias de 1.108 a 8.510 plantas. Na cultura de crame, Cargnelutti Filho et al. (2014) verificaram a necessidade de avaliação de 1.516 a 15.405 plantas para a estimação da média de caracteres com erro máximo de 1% da média. Em nabo forrageiro, Cargnelutti Filho

et al. (2014) verificaram necessidade de avaliação de 217 a 5.751 plantas, dependendo do caractere, para estimação da média com erro de estimação de 2% da média e 95% de confiança.

Considerando-se a dificuldade de mensuração de 12.107 plantas para a estimação dos caracteres de *C. Spectabilis* com erro de, no máximo, 1% da média, foram determinados tamanhos de amostra para condições de maiores erros de estimação (2, 3, ..., 20% da média). Nesse sentido, se o pesquisador desejar estimar a média de AP, PMVG, NSVG e MCG com erros de estimação de, no máximo, 5 e 10% da média, deverá mensurar, respectivamente, 24 e 6 plantas (Tabela 2). Para a mensuração de NRP, MSPA, MSVG, NVG, NS e PTS com erros de estimação de, no máximo, 5 e 10% da média, deverá mensurar, respectivamente, 484 e 121

plantas. Com a utilização de 100 plantas nas avaliações, o erro cometido oscilou entre 1,55 e 11,00%, respectivamente, para MCG e NS. Para a avaliação de massas fresca e seca e produção de sementes de *C. spectabilis* com erro de estimação de 5 e 10% da média, Teodoro et al. (2015) recomendaram a avaliação de, respectivamente, 197 e 49 plantas. Já Cargnelutti Filho et al. (2010) e Cargnelutti Filho et al. (2014) indicaram a avaliação de 155 e 231 plantas, respectivamente, para a estimação da média de caracteres de crambe e de nabo forrageiro, com erro de estimação máximo de 10% da média. Em tremço branco, Burin et al. (2014) verificaram a necessidade de avaliação de 192 plantas para a estimação da média de todos os caracteres com amplitude do intervalo de confiança de 95% de, no máximo, 20% da média.

Tabela 2. Tamanho de amostra (número de plantas) para a estimação da média dos caracteres: altura da planta, número de ramos produtivos, massa seca da parte aérea, massa seca de vagens, número de vagens, peso médio de cada vagem, número de sementes, número médio de sementes por vagem, massa de cem grãos e peso total de sementes para os erros de estimação iguais a 1, 2, ..., 20% da estimativa da média e a semi-amplitude do intervalo de confiança com base na avaliação de 100 plantas de *Crotalaria spectabilis*

Erro	Caractere									
	AP	NRP	MSPA	MSVG	NVG	PMVG	NS	NSVG	MCG	PTS
1%	590	10.202	8.311	11.661	11.467	412	12.107	593	241	11.989
2%	148	2.551	2.078	2.915	2.867	103	3.027	148	60	2.997
3%	66	1.134	923	1.296	1.274	46	1.345	66	27	1.332
4%	37	638	519	729	717	26	757	37	15	749
5%	24	408	332	466	459	16	484	24	10	480
6%	16	283	231	324	319	11	336	16	7	333
7%	12	208	170	238	234	8	247	12	5	245
8%	9	159	130	182	179	6	189	9	4	187
9%	7	126	103	144	142	5	149	7	3	148
10%	6	102	83	117	115	4	121	6	2	120
11%	5	84	69	96	95	3	100	5	2	99
12%	4	71	58	81	80	3	84	4	2	83
13%	3	60	49	69	68	2	72	4	1	71
14%	3	52	42	59	59	2	62	3	1	61
15%	3	45	37	52	51	2	54	3	1	53
16%	2	40	32	46	45	2	47	2	1	47
17%	2	35	29	40	40	1	42	2	1	41
18%	2	31	26	36	35	1	37	2	1	37
19%	2	28	23	32	32	1	34	2	1	33
20%	1	26	21	29	29	1	30	1	1	30
Erro (%)	2,43	10,10	9,12	10,80	10,71	2,03	11,00	2,43	1,55	10,95

AP = Altura da planta; NRP = Número de ramos produtivos; MSPA = Massa seca da parte aérea; MSVG = Massa seca de vagens; NVG = Número de vagens; PMVG = Peso médio de cada vagem; NS = Número de sementes; NSVG = Número médio de sementes por vagem; MCG = Massa de cem grãos; PTS = Peso total de sementes; Erro (%) = Semi-amplitude do intervalo de confiança.

O coeficiente de correlação linear de Pearson (r) entre os pares de caracteres oscilou de $r = -0,192^{ns}$ a $r = 0,991^*$, respectivamente, para as correlações entre NRP e NSVG e entre NS e PTS (Tabela 3). Entre os caracteres explicativos (AP, NRP, MSPA, MSVG, NVG, PMVG, NS, NSVG e MCG), correlações de maior magnitude foram verificadas entre MSPA, MSVG, NVG e NS ($0,865^* \leq r \leq 0,984^*$). Já o caractere principal PTS apresentou maiores correlações com NS ($r = 0,991^*$), MSVG ($r = 0,967^*$), NVG ($r = 0,956^*$) e MSPA ($r = 0,871^*$) e correlações positivas e significativas de menor intensidade com AP ($r = 0,380^*$) e NRP ($r = 0,214^*$). Assim, é provável que plantas com maior número de sementes e de vagens e maiores massas seca de vagens e de parte aérea apresentem maior peso total de sementes.

O diagnóstico de multicolinearidade na matriz de correlação entre caracteres explicativos (AP, NRP, MSPA, MSVG, NVG, PMVG, NS, NSVG e MCG) indicou número de condição de 1.113,08, considerado severo de acordo com Montgomery e Peck (1982). Após a eliminação de MSVG, altamente correlacionada com MSPA, NVG e NS (Tabela 3), e de NSVG, houve redução do número de condição para 107,32. Dessa forma, a análise de trilha do PTS foi realizada em função dos caracteres explicativos AP, NRP, MSPA, NVG,

PMVG, NS e MCG (Tabela 4) e, portanto, o modelo causal foi: $PTS = \hat{\beta}_1 AP + \hat{\beta}_2 NRP + \hat{\beta}_3 MSPA + \hat{\beta}_4 NVG + \hat{\beta}_5 PMVG + \hat{\beta}_6 NS + \hat{\beta}_7 MCG + \text{Resíduo}$.

Os efeitos diretos de AP ($-0,010$), NRP ($-0,012$), MSPA ($0,004$), NVG ($0,024$), PMVG ($0,006$) e MCG ($0,116$) sobre o PTS foram de pequena magnitude e sentidos distintos (Tabela 4) em relação aos observados nas correlações (Tabela 3). Além disso, as elevadas correlações lineares positivas do PTS com MSPA ($r = 0,871^*$) e NVG ($r = 0,956^*$) e as correlações de menor magnitude com AP ($r = 0,380^*$) e NRP ($r = 0,214^*$) se devem a efeitos indiretos dessas variáveis sobre o NS. Dessa forma, esse caractere foi o único que apresentou elevado efeito direto positivo sobre o PTS ($0,981$), com magnitude e direção similares às observadas para a correlação entre NS e PTS ($r = 0,991^*$), indicando relação de causa e efeito. A elevada predição da análise de trilha ($R^2 = 0,995$) e o reduzido efeito residual ($0,073$) indicam elevada confiabilidade nos resultados obtidos. Em crambe, Cargnelutti Filho et al. (2010) verificaram que, para a seleção indireta de plantas com maior produção de grãos, deverá ser avaliado o número de frutos por planta.

Pode-se inferir com base no presente estudo que, para a seleção indireta de plantas com maior PTS, deve-se mensurar o número de sementes (Tabelas 3,4). Caracteres como AP,

→

Tabela 3. Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre os caracteres: altura da planta, número de ramos produtivos, massa seca da parte aérea, massa seca de vagens, número de vagens, peso médio de cada vagem, número de sementes, número médio de sementes por vagem, massa de cem grãos e peso total de sementes avaliados em 100 plantas de *Crotalaria spectabilis*

	AP	NRP	MSPA	MSVG	NVG	PMVG	NS	NSVG	MCG	PTS
AP	1	-0,056 ^{ns}	0,565*	0,391*	0,357*	0,197*	0,386*	0,108 ^{ns}	-0,007 ^{ns}	0,380*
NRP	-0,056 ^{ns}	1	0,370*	0,249*	0,261*	-0,120 ^{ns}	0,204*	-0,192 ^{ns}	0,158 ^{ns}	0,214*
MSPA	0,565*	0,370*	1	0,893*	0,871*	0,138 ^{ns}	0,865*	0,035 ^{ns}	0,063 ^{ns}	0,871*
MSVG	0,391*	0,249*	0,893*	1	0,984*	0,127 ^{ns}	0,965*	0,026 ^{ns}	-0,034 ^{ns}	0,967*
NVG	0,357*	0,261*	0,871*	0,984*	1	-0,028 ^{ns}	0,965*	-0,043 ^{ns}	-0,102 ^{ns}	0,956*
PMVG	0,197*	-0,120 ^{ns}	0,138 ^{ns}	0,127 ^{ns}	-0,028 ^{ns}	1	0,053 ^{ns}	0,429*	0,380*	0,102 ^{ns}
NS	0,386*	0,204*	0,865*	0,965*	0,965*	0,053 ^{ns}	1	0,190 ^{ns}	-0,096 ^{ns}	0,991*
NSVG	0,108 ^{ns}	-0,192 ^{ns}	0,035 ^{ns}	0,026 ^{ns}	-0,043 ^{ns}	0,429*	0,190 ^{ns}	1	-0,052 ^{ns}	0,187 ^{ns}
MCG	-0,007 ^{ns}	0,158 ^{ns}	0,063 ^{ns}	-0,034 ^{ns}	-0,102 ^{ns}	0,380*	-0,096 ^{ns}	-0,052 ^{ns}	1	0,019 ^{ns}
PTS	0,380*	0,214*	0,871*	0,967*	0,956*	0,102 ^{ns}	0,991*	0,187 ^{ns}	0,019 ^{ns}	1

*Significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t, com $n - 2$ graus de liberdade; ^{ns}Não significativo. AP = Altura da planta; NRP = Número de ramos produtivos; MSPA = Massa seca da parte aérea; MSVG = Massa seca de vagens; NVG = Número de vagens; PMVG = Peso médio de cada vagem; NS = Número de sementes; NSVG = Número médio de sementes por vagem; MCG = Massa de cem grãos; PTS = Peso total de sementes.

Tabela 4. Efeitos diretos e indiretos dos caracteres: altura da planta, número de ramos produtivos, massa seca da parte aérea, número de vagens, peso médio de cada vagem, número de sementes e massa de cem grãos sobre o peso total de sementes com base na avaliação de 100 plantas de *Crotalaria spectabilis*.

Caractere	AP	NRP	MSPA	NVG	PMVG	NS	MCG
Efeito direto	-0,010	-0,012	0,004	0,024	0,006	0,981	0,116
Efeito indireto via AP	-	0,001	-0,006	-0,004	-0,002	-0,004	0,000
Efeito indireto via NRP	0,001	-	-0,005	-0,003	0,001	-0,003	-0,002
Efeito indireto via MSPA	0,002	0,002	-	0,004	0,001	0,004	0,000
Efeito indireto via NVG	0,009	0,006	0,021	-	-0,001	0,023	-0,002
Efeito indireto via PMVG	0,001	-0,001	0,001	0,000	-	0,000	0,002
Efeito indireto via NS	0,378	0,200	0,848	0,946	0,052	-	-0,095
Efeito indireto via MCG	-0,001	0,018	0,007	-0,012	0,044	-0,011	-
Correlação de Pearson (r)	0,380*	0,214*	0,871*	0,956*	0,102 ^{ns}	0,991*	0,019 ^{ns}
Coefficiente de determinação R²= 0,995	Efeito da variável residual = 0,073						

*Significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t, com n – 2 graus de liberdade; ^{ns}Não significativo. AP = Altura da planta; NRP = Número de ramos produtivos; MSPA = Massa seca da parte aérea; NVG = Número de vagens; PMVG = Peso médio de cada vagem; NS = Número de sementes; MCG = Massa de cem grãos.

NRP, MSPA e NVG atuam indiretamente sobre o PTS, via NS. Outros caracteres como PMVG e MCG não apresentam associação linear e efeitos diretos sobre o PTS e, portanto, não devem ser considerados na seleção indireta visando à obtenção de plantas com maior produção de sementes.

A variável NS apresentou elevada correlação e efeito direto sobre PTS, indicando relação de causa e efeito e possibilidade de seleção indireta. As demais variáveis explicativas apresentaram efeitos indiretos sobre PTS via NS.

CONCLUSÃO

Em *Crotalaria spectabilis*, são necessárias 121 plantas para a estimação da média dos caracteres NRP, MSPA, MSVG, NVG, NS e PTS com erro de estimação máximo de 10% da média. Já para a estimação de AP, PMVG, NSVG e MCG nesse mesmo nível de precisão, são necessárias 6 plantas.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Educação Tutorial do Ministério da Educação, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e à Fundação Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) pela concessão de bolsas. À empresa Pirai Sementes pela concessão das sementes de *C. spectabilis* para fins de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, M. C. F., Rodrigues, T. J. D. e Mendonça, E. A. F. (2000). Absorção de água por sementes de *Crotalaria spectabilis* Roth determinada em diferentes temperaturas e disponibilidade hídrica. *Revista Brasileira de Sementes*, 22, 206-215.
- Araújo, L. S., Cunha, P. C. R., Silveira, P. M., Sousa Netto, M. e Oliveira, F. C. (2015). Potencial de cobertura do solo e supressão de tiririca (*Cyperus rotundus*) por resíduos culturais de plantas de cobertura. *Revista Ceres*, 62, 483-488. <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737X201562050009>.
- Burin, C., Cargnelutti Filho, A., Toebe, M., Alves, B. M. e Fick, A. L. (2014). Dimensionamento amostral para a estimação da média de caracteres de tremço branco. *Comunicata Scientiae*, 5, 205-212.
- Bussab, W. O., Morettin, P. A. (2011). *Estatística básica*. 7. ed. São Paulo: Saraiva.
- Cargnelutti Filho, A., Facco, G., Lúcio, A. D., Toebe, M., Burin, M., Fick, A. L. e Neu, I. M. M. (2014). Tamanho de amostra para a estimação da média de caracteres morfológicos e produtivos de nabo forrageiro. *Ciência Rural*, 44, 223-227. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782014000200005>.

- Cargnelutti Filho, A., Toebe, M., Alves, B. M., Burin, C., Santos, G. O., Facco, G. e Neu, I. M. M. (2015). Dimensionamento amostral para avaliar caracteres morfológicos e produtivos de aveia preta em épocas de avaliação. *Ciência Rural*, 45, 9-13. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20140504>.
- Cargnelutti Filho, A., Toebe, M., Silveira, T. R., Casarotto, G., Haesbaert, F. M. e Lopes, S. J. (2010). Tamanho de amostra e relações lineares de caracteres morfológicos e produtivos de crambe. *Ciência Rural*, 40, 2262-2267. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782010001100003>.
- Cruz, C. D. (2013). GENES — a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 35, 271-276. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagr.v35i3.21251>.
- Cruz, C. D. e Carneiro, P. C. S. (2006). Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. v. 2. 2. ed. Viçosa: UFV.
- Cruz, C. D. e Regazzi, A. J. (1997). Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. 2. ed. Viçosa: UFV.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: Embrapa.
- Ferreira, D. F. (2009). Estatística básica. 2. ed. Lavras: UFLA.
- Leal, M. A. A., Guerra, J. G. M., Peixoto, R. T. G. e Almeida, D. L. (2012). Desempenho de crotalaria cultivada em diferentes épocas de semeadura e de corte. *Revista Ceres*, 59, 386-391. <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2012000300014>.
- Massey, F. J. (1951). The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association*, 46, 68-78.
- Montgomery, D. C. e Peck, E. A. (1982). Introduction to linear regression analysis. New York: John Wiley & Sons.
- Storck, L., Garcia, D. C., Lopes, S. J. e Estefanel, V. (2011). Experimentação vegetal. 3. ed. Santa Maria: UFSM.
- Teodoro, P. E., Silva Junior, C. A., Ribeiro, L. P., Silva, F. A., Corrêa, C. C. G., Zanuncio, A. S. e Torres, F. E. (2015). Sample dimension for estimation of biomass and yield of sunn (*Crotalaria juncea* L.) and showy rattlebox (*C. spectabilis* Roth.). *Journal of Agronomy*, 14, 98-101. <http://dx.doi.org/10.3923/ja.2015.98.101>.
- Teodoro, R. B., Oliveira, F. L., Silva, D. M. N., Fávero, C. e Quaresma, M. A. L. (2011). Aspectos agronômicos de leguminosas para adubação verde no Cerrado do Alto Vale do Jequitinhonha. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 635-640. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000200032>.
- Wright, S. (1921). Correlation and causation. *Journal of Agricultural Research*, 20, 557-585.
- Wright, S. (1934). The method of path coefficients. *The Annals of Mathematical Statistics*, 5, 161-215.
- Wright, S. (1923). The theory of path coefficients: a reply to Niles's criticism. *Genetics*, 8, 239-255.