

MODELO PARA SIMULAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA VASSOURA-DE-BRUXA DO CACAEIRO NA BAHIA: VALIDAÇÃO DO MODELO

Ricardo B. Sgrillo^{1,2} e Kátia R. P. A. Sgrillo²

¹Ceplac/Centro de Pesquisas do Cacau (Cepec), 45650-970, Itabuna, Bahia, Brasil; sgrillo@cepec.gov.br

²Universidade Estadual de Santa Cruz (Uesc), 45650-000 Ilhéus, Bahia, Brasil; katiassgrillo@uesc.br

Este trabalho teve como objetivo a validação do modelo para simulação da evolução da vassoura-de-bruxa do cacau, publicado em 1994 (Sgrillo e Araújo, 1994). O processo de validação constou principalmente da comparação da produção real de cacau da Bahia, que ocorreu entre as safras de 1993 e 2000, com os resultados previstos pelo modelo para este período. Concluiu-se que os resultados previstos (simulados) não são estatisticamente diferentes dos resultados reais o que permitiu validar o modelo.

Palavras-chave: *Crinipellis perniciosa*, *Theobroma cacao*, modelo matemático.

Simulation model for the development of witches' broom disease of cacao in Bahia: Model validation. This paper has as objective the validation of a simulation model for the development of the witches' broom disease of cocoa in Bahia, published in 1994 (Sgrillo e Araújo, 1994). The validation process was developed mainly comparing the real cocoa production from 1993 to 2000 with the simulated production. It was concluded that the simulated productions were not statistically different from the real productions and the model was considered validated.

Key words: *Crinipellis perniciosa*, *Theobroma cacao*, mathematical model.

Introdução

Modelos matemáticos para simulação vêm sendo desenvolvidos e aplicados, na área agrícola, desde a década de 1970, tendo como objetivos, entre outros, definir estratégias de controle de pragas, prever safras, auxiliar no manejo das plantações, etc. Em fitopatologia estes modelos vêm sendo utilizados para estudar os diversos aspectos dos organismos fitopatogênicos, como epidemiologia (Berger et al., 1995, Bruhn e Fry, 1981), biologia (Scherm e Bruggen, 1993) e dispersão das doenças (Xu e Ridout, 2000), por exemplo. Entretanto, a maior dificuldade que estes modelos encontram para sua aplicação refere-se a validação dos mesmos, ou seja, a comprovação de que os resultados simulados correspondem aos resultados reais. Este trabalho tem como objetivo validar os resultados apresentados no trabalho *Modelo de simulação da evolução da vassoura-de-bruxa do cacau na Bahia* que avaliou a produção regional de cacau em função da evolução da vassoura-de-bruxa na Bahia, publicado em 1994 (Sgrillo e Araújo, 1994). Este modelo previu a produção regional de cacau de 1993 a 2000, utilizando parâmetros biológicos e epidemiológicos do fungo causador da doença (*Crinipellis perniciosa*), como número de infecções por planta, períodos das fases de desenvolvimento, proporção de perda por planta infectada, taxa de infecção, entre outros. Os autores consideraram para as previsões diferentes cenários em função da intensidade de controle da doença utilizada pelos produtores.

O objetivo deste trabalho foi validar o modelo de Sgrillo e Araújo (1994), considerando a conveniência de sua adaptação para as condições atuais de produção de cacau na Bahia, o que poderá permitir a previsão da produção regional, considerando a estratégia de renovação da lavoura cacauífera com clones tolerantes a doença.

Métodos

A metodologia para validação utilizou o seguinte procedimento:

- a. Escolher, dentre os três cenários utilizados no trabalho original, aquele que mais se aproximou das condições reais que ocorreram de 1993 a 2000;
- b. Comparar os resultados obtidos na simulação (evolução da área afetada pela vassoura-de-bruxa e produção de cacau) com os correspondentes valores reais que ocorreram de 1993 a 2000.

a. Escolha do Cenário

Para realização das simulações o trabalho original (Sgrillo e Araújo, 1994) apresentou três cenários, considerando a percentagem de área com aplicação das técnicas de controle recomendadas pela CEPLAC:

1. Manutenção da situação atual: *Se as atuais condições de preço do cacau continuarem nesta década e se não for desenvolvido método eficiente de controle da vassoura-de-bruxa, mais viável economicamente.* Previsto o controle de 28% da área de cacau de 1993 à 2000;

2. Abandono das plantações: *Após dois ou três anos sem controle da vassoura-de-bruxa, uma plantação de cacau pode atingir um nível de infecção tão elevado que a sua recuperação, considerando o preço atual do cacau e o nível de descapitalização dos produtores, é praticamente inviável. Como estas áreas abandonadas possuem alta densidade de inóculo, as áreas adjacentes, se não forem cuidadas, atingirão rapidamente o mesmo estado. Se essa tendência perdurar é provável que um número crescente de produtores abandonem suas propriedades, como já está acontecendo.* Previsto decréscimo da área controlada de 28% em 1993 à 0% em 2000;

3. Controle da doença: *Este cenário poderá ocorrer caso se realizem uma ou mais das seguintes situações:*

1. *Erro nas previsões da International Cocoa Organization e recuperação expressiva do preço do cacau;*

2. *Descoberta de um método eficiente e economicamente viável de controle da doença;*

3. *Adoção de políticas agrícolas governamentais que permitam a negociação das dívidas dos produtores e acesso ao financiamento barato para controle da doença e recuperação das propriedades.*

Previsto aumento da área controlada de 28% em 1993 à 70% em fins de 1994, mantendo-se este percentual constante até o ano 2000.

Inicialmente os cenários foram analisados e comparados com as condições que ocorreram na realidade no período considerado, escolhendo-se então, o Cenário que mais se aproximasse das condições reais.

Também foram avaliadas as médias da produção de cacau geradas pelas simulações referentes a cada cenário através da comparação com a média da produção real ocorrida entre 1993 e 2000. Para esta comparação a produção simulada, expressa originalmente em percentagem da produção potencial, foi convertida em Toneladas, multiplicando-se as percentagens pela

produção potencial de 288.000 T (calculada multiplicando-se a área regional com cacau de 640.000 ha pela produtividade potencial de 450 kg/ha, conforme descrito no trabalho original). As comparações foram feitas através do cálculo do erro relativo das médias das produções de cada cenário em relação a média da produção real, conforme equação 1:

$$Erro = 100 \times \frac{(VR - VS)}{VR} \quad 1$$

onde *Erro* corresponde ao erro relativo percentual, *VR* é o valor real e *VS* é o valor simulado.

Estas comparações tiveram como objetivo verificar se o cenário mais aproximado às condições reais gerava também as melhores estimativas de produção.

b. Validação do Modelo

Inicialmente avaliou-se a evolução da área infectada gerada pela simulação comparando-a com a evolução real da área infectada. Para esta comparação utilizou-se dados de Lisboa (1998), que determinou a percentagem de área infectada em Itajuípe, Bahia, em setembro de 1994, março de 1995, junho de 1997 e junho de 1998. Este autor categorizou a área infectada em três níveis dependendo da percentagem da área das fazendas que estava infectada com vassoura-de-bruxa. As fazendas que apresentavam infecção em até 10% de sua área foram categorizadas como nível 1. As que apresentavam infecção entre 10% e 30% da área foram categorizadas como nível 2 e as que apresentavam infecção em mais de 30% da área foram consideradas como nível 3. No entanto, os critérios para esta categorização diferem dos utilizados no trabalho original que utilizou as descrições de Laker e Mota (1990), que consideram a categorização das áreas infectadas como função de intensidade de infecção [percentagem de plantas infectadas e número de infecções (sintomas) por planta]. Por este motivo a comparação da evolução da área infectada foi feita somente considerando-se o total das áreas nível 2 e nível 3 de Lisboa (1998) e o total das áreas simuladas de grau 2 e grau 3. Considerando-se que houve somente quatro avaliações da área real infectada não foram utilizados testes estatísticos para a comparação entre os valores reais e simulados. Calculou-se somente o erro relativo, conforme equação 1.

Para validação do modelo comparam-se resultados simulados da produção de cacau da Bahia gerados pelo cenário escolhido com os resultados da produção real de 1993 a 2000. Também para estas comparações as produções simuladas percentuais foram convertidas em toneladas métricas, multiplicando-se as percentagens pela produção potencial de 288.000 T.

Para as comparações dos resultados de produção simulados com os reais foram utilizados os seguintes métodos:

- a. análise visual dos resultados;
- b. análise das estatísticas descritivas dos resultados;
- c. análises estatísticas:
 - o teste *t* entre as médias dos resultados;
 - o correlação entre os resultados;
 - o regressão linear entre os resultados.

Para a regressão linear entre a produção simulada e a produção real utilizou-se a equação 2:

$$Ps = a + b * Pr + \epsilon \quad 2$$

onde *Pr* representa a produção real, *Ps* a simulada, *a* e *b* são os parâmetros da regressão e ϵ representa os desvios ou resíduos.

Para que a produção simulada seja igual a real o parâmetro *a* não deve ser diferente de zero e o parâmetro *b* não deve ser diferente de um. Portanto as hipóteses testadas para o parâmetro *a* são:

$$H_0: a = 0$$

$$H_1: a \neq 0$$

De forma similar as hipóteses avaliadas para o parâmetro *b* são:

$$H_0: b = 1$$

$$H_1: b \neq 1$$

A significância estatística da regressão foi avaliada pela análise da variância do coeficiente de correlação. A significância dos valores dos parâmetros *a* e *b* foi avaliada pelo teste *t*.

Como os desvios da linearidade são muitas vezes difíceis de serem detectados visualmente, pode-se verificar a sua adequação por meio do cálculo dos resíduos entre os valores medidos e os valores calculados a partir da equação de regressão (INMETRO, 2002). Calcula-se o valor de *t* pela equação 3:

$$t_{\text{calculado}} = \frac{\text{resíduo}}{Sr / \sqrt{n}} \quad 3$$

onde resíduo corresponde ao valor ϵ da equação 2, ou seja a diferença entre a produção real e a estimada pela equação de regressão, *Sr* representa o desvio padrão dos resíduos e *n* o número de pontos na regressão.

Se o valor de *t* calculado para qualquer ponto estimado for menor ou igual ao valor de *t* para a confiança desejada e *n*-1 graus de liberdade, considera-se que o ponto pertence à curva e a faixa até ele é linear.

Resultados e Discussão

a. Escolha do Cenário

O preço internacional do cacau apresentou, de 1990 a 2000, a média mais baixa dos últimos 25 anos, conforme representado na Figura 1. De 1975 a 1982 o preço internacional médio do cacau, por Tonelada métrica, foi de US\$ 2.528, de 1982 a 1990, de US\$ 1.855 e de 1990 a 2000 o preço médio foi de US\$ 1.301. Estas condições de preço provavelmente não foram suficientes para estimular o produtor a aplicar as únicas técnicas de controle disponíveis na época, que constavam essencialmente da onerosa retirada manual das partes infectadas das plantas, duas ou três vezes por ano. O conseqüente declínio da produtividade associada aos baixos preços verificados levou a um abandono gradativo das propriedades. Estas condições aproximaram-se às descritas no Cenário 2 do trabalho original.

Também a produção média anual gerada pelo Cenário 2 foi a que mais se aproximou da produção real, apresentando um erro relativo, estimado conforme equação 1, de somente 1,31%, bastante menor do que os erros relativos referentes ao Cenário 1 (28,7%) e ao Cenário 3 (51,3%) como pode ser verificadas na Tabela 1.

Desta forma escolheu-se o Cenário 2 para validação do modelo.

b. Validação do Modelo

Na Tabela 2 e na Figura 2 são apresentados os resultados que correspondem à comparação da evolução das áreas infectadas pela vassoura-de-bruxa gerados pelo modelo de simulação e os resultados dos levantamentos de campo realizados por Lisboa (1998). De modo geral os resultados simulados aproximam-se dos resultados reais, embora os critérios utilizados por Lisboa (1998) para categorização das áreas não tenham sido exatamente

Figura 1. Preço internacional do cacau (ICCO, 2003) indicando as médias dos períodos de 1975 a 1982, 1982 a 1990 e 1990 a 2000 e assinalando o ano de introdução da vassoura-de-bruxa na Bahia, Brasil.

Tabela 1. Média da produção real de cacau no período 1993-2000 e média e erro relativo das produções simuladas considerando os Cenários 1, 2 e 3, Bahia, Brasil.

Estatística	Produção média anual (T)			
	Real	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Média	187.508,6	241.344,0	185.040,0	283.634,0
Erro relativo (%)	-	28,71	-1,32	51,26

Tabela 2. Área infectada real no município de Itajuípe, área infectada simulada (Cenário 2) e respectivos erros relativos em setembro de 1994, março de 1995, junho de 1997 e junho de 1998, Bahia, Brasil.

Período	Área Infectada (%)		Erro relativo (%)
	Real ⁽¹⁾ nível 2 + nível 3	Simulada ⁽²⁾ grau 2 + grau 3	
setembro 1994	32.7	29.0	11.31
Março 1995	40.0	41.7	-4.25
Junho 1997	88.5	100.0	-12.99
junho 1998	90.8	100.0	-10.13

⁽¹⁾ Lisboa, 1998

⁽²⁾ Sgrillo e Araújo, 1994

Figura 2. Área infectada simulada (grau 2 + grau 3) (Sgrillo e Araújo, 1994) e área infectada real (nível 2 + nível 3) segundo Lisboa (1998) no Município de Itajuípe, de setembro de 1994 à junho de 1998. Bahia, Brasil.

os mesmos utilizados no modelo de simulação do trabalho original, conforme exposto anteriormente. A evolução da área infectada é mais acentuada nos resultados simulados onde em junho de 1997 e junho de 1998 apresenta valores de 100% de área infectada, enquanto os levantamentos de campo indicavam respectivamente 88.5% e 90.8 % de área infectada nestes períodos de levantamentos. Uma possível superestimativa da taxa de infecção da vassoura-de-bruxa utilizada no modelo original poderia ter provocado a simulação de uma evolução mais rápida da doença, gerando as diferenças observadas entre os resultados reais e simulados.

Mesmo assim considerou-se que o modelo gerou resultados coerentes com os resultados reais, uma vez que o erro relativo médio entre os resultados reais e simulados foi de cerca de 10%.

Na Tabela 3 e na Figura 3 são apresentadas as produções de cacau, reais e simuladas, da safra 1993 a safra 2000 do Estado da Bahia, em valores percentuais e em toneladas métricas.

Observando-se a Figura 3 verifica-se que há uma boa concordância entre os resultados simulados e reais, embora em 1996, 1998 e 1999 as produções simuladas tenham se afastado mais acentuadamente das reais. A produção simulada decaiu mais rapidamente a partir de 1996, enquanto a produção real tem uma redução mais lenta. Mesmo assim, na última safra do período (ano 2000), os resultados são bastante aproximados.

Na Tabela 4 são apresentadas as estatísticas descritivas dos resultados, compostas das médias, erros padrão, medianas, desvios padrão, coeficientes de variação, amplitudes, valores mínimo, valores máximo, somas e níveis de confiança (95.0%) das médias das produções real e simulada.

A diferença entre as médias da produção simulada e real foi de 2.469 T o que corresponde a um erro relativo percentual de somente 1,31 %. A produção real mínima que ocorreu (safra do ano 2000) foi de 96.038 T, 16% superior a produção mínima simulada de 80.640 T. De modo geral a Figura 3 e as estatísticas da Tabela 4

Tabela 3. Produção de cacau real e simulada, em percentagem e toneladas métricas, das safras de 1993 a 2000. Bahia, Brasil.

Safra	⁽¹⁾ Produção real		⁽²⁾ Produção simulada	
	(T)	(%)	(T)	(%)
1993	254.464	88,4	288.000	100
1994	278.280	96,6	288.000	100
1995	238.886	82,9	273.600	95
1996	160.390	55,7	224.640	78
1997	185.247	64,3	152.640	53
1998	152.381	52,9	92.160	32
1999	134.383	46,7	80.640	28
2000	96.038	33,3	80.640	28
Totais	1.500.069	-	1.480.320	-
Média anual	187.508,6		185.040,0	

⁽¹⁾ CEPLAC (2003)

⁽²⁾ Sgrillo e Araújo (1994)

Figura 3. Valores reais (CEPLAC, 2003) e simulados (Sgrillo e Araújo, 1994) da produção de cacau na Bahia, de 1993 a 2000.

Tabela 4. Estatísticas descritivas da produção real de cacau e da produção simulada, correspondentes às safras de 1993 a 2000. Bahia, Brasil.

Estatística	Produção real	Produção simulada
Média	187.508,63	185.040,00
Erro padrão	22.569,65	33.297,29
Mediana	172.818,50	188.640,00
Desvio padrão	63.836,61	94.178,96
Coefficiente de variação	34.04	50.90
Amplitude	182.242,00	207.360,00
Valor Mínimo	96.038,00	80.640,00
Valor Máximo	278.280,00	288.000,00
Soma	1.500.069,00	1.480.320,00
Nível de confiança (95.0%)	53.368,71	78.735,52

mostram que as distribuições da produção real e simulada são bastante semelhantes.

Estatisticamente as médias anuais da produção real e simulada não são significativamente diferentes, quando analisadas pelo teste *t*, conforme apresentado na Tabela 5. Esta Tabela apresenta os resultados referentes às análises estatísticas correspondentes ao teste *t*, para diferenças significativas entre as médias das produções real e simulada e os resultados referentes à análise de correlação entre os valores reais e simulados.

A análise de correlação entre a produção real e simulada foi significativa a 99.9% de probabilidade,

Quadro 5. Testes estatísticos entre as produções real e simulada de cacau, correspondentes às safras de 1993 a 2000. Bahia, Brasil.

Estatística	Valor
Teste <i>t</i> entre as médias	0,15 ns
Limite crítico de $t_{0,01(7)}$	3,00
Coefficiente de correlação <i>r</i>	0,91
Teste <i>F</i> para <i>r</i>	27,64**
Limite crítico de $F_{0,01(1,6)}$	13,74

ns - não significativo

** significativo a 1%

apresentado um coeficiente de correlação de 0.91. Ressalta-se que o valor do teste *F* para o coeficiente de correlação *r*, na Tabela 5, corresponde ao teste *F* para a regressão linear entre os valores simulados e reais.

Estes resultados são satisfatórios, principalmente considerando que o modelo original não incluiu variações na produção por outras causas diferentes da vassoura-de-bruxa, como condições climáticas, incidência de outras pragas e efeitos de variações no preço do cacau, por exemplo.

Os resultados referentes a análise de regressão entre os valores previstos (*Ps*) e os valores reais (*Pr*) são apresentados no Figura 4 e na Tabela 6. O teste *t* para o valor de *a* ($a = 0$) e de *b* ($b = 1$) foram ambos não significativos, ou seja, os valores simulados, estatisticamente, não são considerados diferentes dos valores reais. A Figura 4 apresenta a linha de regressão e as linhas que delimitam o intervalo de confiança das estimativas ao nível de 5%. Observa-se que somente dois pontos não pertencem à regressão. Este fato aparece com mais detalhe na Tabela 7 que apresenta a produção simulada, a produção estimada com a equação de regressão, os respectivos desvios e o teste *t* para cada desvio. Verifica-se que *t* apresentou valores significativos para as safras de 1996 e 1998, o que significa que as

Tabela 6. Parâmetros *a* e *b* da regressão linear entre as produções real produção real e simulada de cacau, das safras de 1993 a 2002, e respectivos erros padrão e valores da estatística *t*.

Parâmetro	Coefficientes	Erro padrão	Hipótese	<i>t</i>
<i>a</i>	-65.714,41	50.054,43	Ho: $a=0$ H1: $a\neq 0$	-1,31 ns
<i>b</i>	1,34	0,25	Ho: $b=1$ H1: $b\neq 1$	1,33 ns

ns - não significativo

Tabela 7. Análise dos desvios, apresentando a produção simulada (Prod. simulada), a produção estimada pela equação de regressão (Prod. estimada), os desvios (Prod. simulada - Prod. estimada), e os correspondes valores da teste *t*, para os anos de 1993 a 2000. Bahia, Brasil.

Ano	Produção simulada	Produção estimada	Desvio	<i>t</i>
1993	288.000,00	274.579,11	13.420,89	0,95
1994	288.000,00	306.428,14	-18.428,14	-1,31
1995	273.600,00	253.746,72	19.853,28	1,41
1996	224.640,00	148.774,39	75.865,61	5,40**
1997	152.640,00	182.015,54	-29.375,54	-2,09
1998	92.160,00	138.063,99	-45.903,99	-3,26*
1999	80.640,00	113.995,35	-33.355,35	-2,37
2000	80.640,00	62.716,76	17.923,24	1,27

* significativo a 5%

** significativo a 1%

produções simuladas para estes anos não pertencem, estatisticamente, à linha de regressão, isto é, não podem ser consideradas como estimativas da produção real. No entanto a produção real dos restantes seis anos foi prevista com acerto pelo modelo de simulação.

Conclusão

Conclui-se que o modelo publicado em 1994 pode ser considerado validado e que as previsões realizadas para produção regional, considerando o Cenário 2 do trabalho original, corresponderam as produções reais da região.

Esta conclusão é coerente com os resultados de Santos et al. (1998) que avaliaram as perdas reais de produção de cacau na Bahia, devido á vassoura-de-bruxa, comentando: *Os resultados de perda de safra de cacau pelo ataque de vassoura-de-bruxa obtidos com o método proposto estão em concordância com os resultados de simulações feitas por Sgrillo e Araújo (1994), para dois tipos de cenário, dentro do âmbito das suposições feitas nos dois casos.*

Desta forma o modelo poderia, com as necessárias adaptações, ser utilizado para previsão da produção de cacau da Bahia, considerando a utilização do novo material genético, tolerante à vassoura-de-bruxa, que vem sendo utilizado na região.

Literatura Citada

- BERGER, R.D. et al. 1995. A simulation model to describe epidemics of rust of Phaseolus beans. I. Development of the model and sensitivity analysis. *Phytopathology* 85: 715-721.
- BRUHN, J.A.; FRY, W.E. 1981. Analysis of potato late blight epidemiology by simulation modeling. *Phytopathology* 71:612-616.
- CEPLAC. 2003. Produção de cacau em amêndoas no Estado da Bahia segundo registro da CCCB. Disponível em: http://www.ceplac.gov.br/prod1_cacau_bahia.htm
- INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. 2002. Orientações sobre validação de métodos de ensaios químicos. DOQ-CGCRE-008. Revisão: 00 - outubro/2002, Brasília. 31p.
- LAKER, H. A. 1990. Witches' broom disease in the State of Rondonia, Brazil: historical perspectives and present situation. *Cocoa Growers' Bulletin* nº 43. pp.45-59
- LISBOA, G. J. 1998. Impacto da Vassoura de Bruxa sobre a Produção de cacau no Município de Itajuípe-BA. 59p. (Monografia).
- QUARTERLY BULLETIN OF COCOA STATISTICS - 2003/2004. London, ICCO, v 30, n. 1.
- SANTOS, L.P.; FREIRE, E.S.; CARZOLA, I.M. 1998. Estimativas de perdas de produção de cacau causadas por vassoura-de-bruxa (*Crinipellis pernicios* (Stahel) Singer) na Bahia. *Agrotrópica (Brasil)* 10(3): 127-130
- SCHERM, H.; VAN BRUGGEN, A. H. C. 1993. Response surface models for germination and infection of *Bremia lactucae*, the fungus causing downy mildew of lettuce. *Ecological Modeling* 65:281-296.
- SGRILLO, R.B.; K.R.P. ARAUJO. 1994. Modelo de simulação da evolução da vassoura-de-bruxa do cacauero na Bahia. *Agrotrópica (Brasil)* 6(3): 73-84
- XU X-M.; M.S. RIDOUT. 2000. Stochastic simulation of the spread of race specific and non-specific aerial fungal pathogens in cultivar mixtures. *Plant Pathology* (49): 207-218.