

# ANÁLISE DA ADAPTABILIDADE ATRAVÉS DE REGRESSÃO LINEAR SEGMENTADA

## 2. APLICAÇÃO <sup>1</sup>

JOÃO GILBERTO CORRÊA DA SILVA <sup>2</sup>

**RESUMO** - O método de regressão linear simples de Finlay & Wilkinson (1963), estendido por Eberhart & Russell (1966), postula uma relação linear simples entre a resposta do genótipo e o índice de ambiente. Desta forma, ele não é capaz de identificar o genótipo com sensibilidade de resposta ao ambiente desejável, ou seja, o genótipo responsivo a ambientes favoráveis ou melhorados e que mantenha produtividade razoável em ambientes adversos. Silva & Barreto (1986) propõem um modelo linear segmentado que permite distinguir os diversos padrões de resposta que compreendem as combinações de taxas de variação baixa, média e elevada nos ambientes desfavoráveis e nos ambientes favoráveis. Silva (1995) aborda este modelo no contexto do modelo linear geral e formula o método de regressão linear segmentada como uma extensão do método de regressão linear simples para proporcionar mais possibilidades para inferências com vistas à caracterização e comparação de genótipos quanto à adaptabilidade ao ambiente. Este artigo ilustra este método através de sua aplicação a dados de um experimento de comparação de cultivares de arroz de sequeiro.

Termos para indexação: adaptabilidade ao ambiente, estabilidade fenotípica, interação genótipo x ambiente.

## ANALYSIS OF ADAPTATION THROUGH SEGMENTED LINEAR REGRESSION

### 2. APPLICATION

**ABSTRACT** - The method of simple linear regression of Finlay & Wilkinson (1963), extended by Eberhart & Russell (1966), assumes a simple linear relation between the response of a genotype and the environmental index. Thus, it is not able to identify the genotype with the desirable sensibility of response to the environment, that is, the genotype responsive to favorable or improved environments and which maintain reasonable productivity in adverse environments. Silva & Barreto (1986) propose a segmented linear model which allows to distinguish the several patterns of response which comprise the combinations of low, average and high responsiveness in the unfavorable and favorable environments. Silva (1995) approaches this model in the context of the general linear model and presents the method of segmented linear regression as an extension of the simple linear regression method to provide more possibilities for inferences to characterize and compare genotypes with regards to the adaptability to the environment. This paper illustrates this method through its application to data of an experiment for comparison of upland rice cultivars.

Index terms: environmental adaptation, phenotypic stability, genotype x environment interaction.

## INTRODUÇÃO

Programas de melhoramento genético vegetal contemplam uma ou mais etapas de avaliação de genótipos. A mais avançada consiste de um

experimento de campo conduzido em um número limitado de locais da região de interesse, numa sucessão de anos. Nesta etapa, são efetuadas avaliações, em intervalos anuais, com o propósito de estabelecer recomendações de genótipos para cultivo.

A produtividade é, usualmente, o critério mais importante nessas avaliações. A medida de produtividade comumente utilizada é o rendimento

<sup>1</sup> Aceito para publicação em 12 de janeiro de 1995.

<sup>2</sup> Eng. Agr., Ph.D., Prof. Titular (aposentado), Prof. Adjunto, Dep. de Matemática, Estatística e Computação, Inst. de Física e Matemática, Univ. Fed. de Pelotas, Caixa Postal 354, CEP 96010-900 Pelotas, RS. Bolsista do CNPq.

médio observado nos últimos anos. Entretanto, a consideração apenas do rendimento médio é inadequada, já que não exprime, completamente, consistência de comportamento numa região.

A agricultura moderna demanda cultivares que, além de rendimento médio satisfatório, manifestem conveniente sensibilidade de resposta à variação de ambiente. É especialmente desejável uma cultivar que tenha capacidade não apenas de tirar proveito de ambientes melhorados ou mais favoráveis, mas, também, de produzir razoavelmente bem em ambientes adversos. Uma medida de resposta da produtividade ao ambiente que exprima esse conceito de ampla adaptabilidade é de elevada importância. Tal medida deveria ser utilizada como um critério adicional na avaliação de cultivares para recomendação, com vistas a diminuir os riscos e elevar o lucro dos agricultores (Nor & Cady, 1979).

Informações sobre a adaptabilidade relativa de um grupo de genótipos podem ser obtidas pela análise da interação genótipo x ambiente. O método de regressão linear simples tem sido o mais utilizado e discutido na literatura. Esse método relaciona o rendimento médio de cada genótipo com o índice de ambiente, provido pela resposta média dos próprios genótipos. Ele foi originalmente sugerido por Yates & Cochran (1938) e, posteriormente, desenvolvido principalmente por Finlay & Wilkinson (1963) e Eberhart & Russell (1966). Uma síntese da caracterização desse método e de suas restrições é apresentada por Silva (1995).

Esse método condiciona uma relação linear exata entre a resposta média de ambiente global para todos os genótipos e o índice de ambiente. Se os genótipos apresentam semelhantes padrões de resposta às características ambientais, essa propriedade induz a linearidade das relações entre as respostas individuais dos genótipos e o índice de ambiente. Ademais, ele é fácil de aplicar e reduz complexas interações a um conjunto de poucos e significativos parâmetros. Por esse motivo, o método de regressão linear simples tem sido utilizado e mostrado utilidade numa amplitude notável de casos.

De modo geral, entretanto, a relação entre a resposta média individual de um genótipo e a condição ambiental representada pelo índice de ambiente pode ser não linear (Knight, 1970; Wright,

1971; Witcombe & Whittington, 1971; Easton & Clements, 1973; Freeman, 1973).

Desvios da linearidade podem resultar de diferenças de comportamento dos genótipos quanto à variação de sensibilidade de resposta entre ambientes desfavoráveis e favoráveis. Numa coleção de genótipos suficientemente grande, podem ser identificados diversos padrões de resposta, entre eles os seguintes: resposta com taxa de variação elevada em ambientes desfavoráveis e baixa em ambientes favoráveis, igual taxa de variação em ambientes desfavoráveis e favoráveis, e taxa de variação baixa em ambientes desfavoráveis e elevada em ambientes favoráveis. Este último padrão de comportamento caracteriza o genótipo teoricamente ideal (Verma et al., 1978).

O método de regressão linear simples de Finlay & Wilkinson (1963) e Eberhart & Russell (1966) não permite a discriminação desses distintos padrões de resposta.

Com esse argumento, Silva & Barreto (1985), explorando sugestão de Verma et al. (1978), propõem representar a resposta de um genótipo à gama de ambientes por um gráfico composto de dois segmentos de reta conectados no ponto correspondente ao índice de ambiente nulo. Dessa forma, é levada em conta a possibilidade de alterações dos comportamentos das respostas individuais dos genótipos entre ambientes desfavoráveis e favoráveis.

Silva (1995) aborda esse modelo de regressão linear segmentada no contexto do modelo linear geral. O método de regressão linear segmentada é formulado como uma extensão do método de regressão linear simples para proporcionar maiores possibilidades de inferências com vistas à caracterização e comparação de genótipos quanto à adaptabilidade ao ambiente.

Este artigo tem como propósito a ilustração da aplicação desse método em comparação com o método de regressão linear simples de Finlay & Wilkinson (1963) e Eberhart & Russell (1966).

## MATERIAL E MÉTODOS

São considerados os dados de produção de grãos de três anos agrícolas (1974/75, 1975/76 e 1976/77) de um experimento do programa de melhoramento de arroz de

sequeiro do Instituto Agronômico de Campinas, conduzido em nove locais do Estado de São Paulo, compreendendo 21 ambientes. A caracterização das oito cultivares do experimento, dos locais, particularmente no que diz respeito a condições climáticas, bem como de outros aspectos relevantes do experimento é apresentada por Silveira (1980) e Silveira & Vencovsky (1988).

Os rendimentos médios das oito cultivares, o índice de ambiente e a estimativa da variância do erro para cada um dos 21 ambientes são apresentados na Tabela 1. Os resultados da análise conjunta dos 21 ambientes, etapa antecedente à análise da adaptabilidade, são apresentados nas partes superior e inferior da Tabela 2, delimitadas por linhas tracejadas. Nessa análise, os números de graus de liberdade da interação cultivar x ambiente e do erro combinado foram ajustados pelo método sugerido por Cochran (1954) e adaptado por Pimentel-Gomes (1990), para levar em conta a heterogeneidade do erro entre ambientes.

A elevada significância da interação cultivar x ambiente revelou que as cultivares tiveram diferentes comportamentos de resposta à variação do ambiente. Esse resultado justificou o estudo da adaptabilidade das cultivares.

A análise de adaptabilidade foi efetuada pelo método de regressão linear simples (Finlay & Wilkinson, 1963; Eberhart & Russell, 1966) e pelo método de regressão linear segmentada (Silva & Barreto, 1985; Silva, 1995).

O método de regressão linear segmentada exprime o rendimento médio observado do *i*-ésimo genótipo no *j*-ésimo ambiente pela seguinte equação:

$$y_{ij} = b_{0i} + b_{1i}x_{1j} + b_{2i}x_{2j} + e_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, C; \quad j = 1, 2, \dots, A,$$

onde  $x_{1j} = I_j$  e  $x_{2j} = \delta_j I_j$ , sendo  $I_j$  o índice de ambiente, ou seja, para cada ambiente, o desvio de sua média em relação à média geral:  $I_j = \bar{Y}_j - \bar{Y}$ , e  $\delta_j = 0$  se  $I_j \leq 0$ ,  $= 1$  se  $I_j > 0$ ;  $b_{1i}$  é a declividade do segmento de reta para o genótipo *i* nos ambientes desfavoráveis;  $b_{2i}$  é a alteração de declividade da reta segmentada entre os ambientes desfavoráveis e favoráveis (a que correspondem  $I_j \leq 0$  e  $I_j > 0$ , respectivamente);  $b_{0i}$  é a ordenada do ponto de interseção desses dois segmentos de reta; e  $e_{ij} = \varepsilon_{ij} + d_{ij}$ , sendo  $\varepsilon_{ij}$  o desvio entre os rendimentos observado e esperado do *i*-ésimo genótipo no ambiente *j* e  $d_{ij}$  o desvio entre o efeito da interação genótipo x ambiente e seu componente sistemático atribuível à relação linear com o efeito de ambiente.

De acordo com o método de regressão linear segmentada, a adaptabilidade do genótipo *i* é caracterizada pelos seguintes parâmetros: rendimento médio:

$b_{0i} + b_{2i}\bar{x}_2$ , onde  $\bar{x}_2$  é a média dos índices de ambiente positivos; taxa de variação do rendimento nos

ambientes desfavoráveis:  $b_{1i}$ ; e taxa de variação nos ambientes favoráveis:  $b_{1i} + b_{2i}$ . A variância do desvio da regressão:  $\sigma_{d_i}^2$  é um parâmetro adicional que deve ser

considerado com cautela na avaliação da adaptabilidade e estabilidade fenotípica (Silva, 1995).

Silva (1995) expõe os procedimentos de inferência para esse modelo no contexto do modelo linear geral, particularmente os procedimentos de testes de hipóteses referentes à adequabilidade do método de regressão linear segmentada e à caracterização comparativa da adaptabilidade dos genótipos.

Os ajustamentos de diversos modelos lineares individuais e conjuntos para as cultivares para a derivação das inferências de interesse foram efetuados através do procedimento GLM (Generalized Linear Models) do Statistical Analysis System (SAS Institute Inc., 1985).

## RESULTADOS

### Análise pelo método de regressão linear simples

A Tabela 2 apresenta a decomposição da soma de quadrados da interação genótipo x ambiente nos componentes atribuíveis às diferenças entre as retas ajustadas para as oito cultivares e aos desvios acumulados dessas linhas de regressão (resíduo combinado). Os resultados nesta Tabela revelam ausência de significância da heterogeneidade das linhas de regressão e elevada significância do resíduo combinado. Nesses testes, o quadrado médio da heterogeneidade foi contrastado com o quadrado médio do resíduo combinado e este com o quadrado médio do erro combinado, em decorrência da pressuposição de efeitos aleatórios de ambiente. Alguns autores, como Perkins & Jenkins (1968), por exemplo, usam o quadrado médio do erro combinado para ambos os testes, por pressuporem efeitos fixos de ambiente.

A ausência de significância da heterogeneidade das linhas de regressão é uma indicação da inadequação do método de regressão linear simples no presente caso. Entretanto, mesmo assim, a aplicação desse método foi completada para comparação de seus resultados com os obtidos pela aplicação do método de regressão linear segmentada.

Os rendimentos médios das oito cultivares nos 21 ambientes e as estimativas dos parâmetros de

**TABELA 1. Rendimentos médios das oito cultivares (kg/ha), índice de ambiente e estimativa da variância do erro, para cada um dos 21 ambientes.**

Amb.	Cultivar								Índice de ambiente	Quadrado médio do erro <sup>1</sup>
	Pratão precoce	Batatais	IAC 25	IAC 5032	IAC 1246	IAC 5544	IAC 1131	IAC 47		
1	3933	3608	3928	3751	3310	3124	3274	3542	1535,1	43290,68
2	1971	1651	2634	2043	1614	1701	1506	2014	-131,9	33544,39
3	1613	2143	2257	2042	2421	2625	2758	2470	267,4	34245,39
4	2297	2511	2532	818	753	732	564	914	-633,6	21162,24
5	1356	1289	1450	918	633	670	571	1081	-1027,7	3490,50
6	2318	2106	2558	435	199	263	165	563	-947,8	11553,31
7	844	1338	697	3139	3164	3549	3021	3729	411,4	67360,44
8	1201	1104	1076	3597	3354	3410	3813	3743	638,6	54525,89
9	1465	1267	1408	1356	1083	1135	1196	1749	-691,3	6166,55
10	1564	1744	2076	1495	1653	1257	1311	2174	-364,4	32244,13
11	2094	2568	2890	2597	2413	2740	2699	2839	581,3	10686,24
12	1222	1361	1139	1306	1292	1361	1410	1535	-695,4	14232,21
13	2063	1662	2438	2236	2351	2285	2493	2771	263,7	28183,46
14	2250	2215	2090	2951	3049	2743	2861	2736	588,2	33995,69
15	706	533	1074	1200	1395	1282	1401	1665	-866,7	10471,50
16	2047	1910	1992	1921	1794	1944	1986	2132	-57,9	14937,42
17	1264	1109	1599	711	634	629	676	416	-1143,9	5369,36
18	3508	3218	4313	3257	3597	3826	3590	3313	1554,1	37762,62
19	6124	6889	6082	3813	3860	3989	3870	4029	2808,3	6961,80
20	1551	1339	1461	744	58	522	671	932	-1051,4	4597,90
21	2195	2267	2108	246	289	274	238	285	-1035,9	7487,74

<sup>1</sup> Para a média de uma cultivar, baseada em oito repetições, com 42 graus de liberdade.

estabilidade fenotípica e adaptabilidade de Finlay & Wilkinson e Eberhart & Russell são apresentados na Tabela 3. Os gráficos das retas ajustadas para as oito cultivares estão na Fig. 1.

Os resultados na Tabela 3 e os gráficos da Fig. 1 indicam que as oito cultivares não se distinguiram significativamente ( $\alpha=0,05$ ), tanto quanto ao

rendimento médio como quanto à taxa de variação da resposta nos ambientes em consideração. Esses resultados são contraditórios à elevada significância ( $P<0,0001$ ) da interação cultivar x ambiente. Esse fato e as elevadas significâncias dos desvios das regressões para todas as oito cultivares são indicativos da inadequação da pressuposição de taxa

**TABELA 2. Análise da variação conjunta das médias das oito cultivares nos 21 ambientes, e decomposição da variação da interação cultivar x ambiente, segundo os métodos de regressão linear simples e de regressão linear segmentada.**

Fonte de variação	GL <sup>1</sup>	SQ	QM	Prob.>F
Cultivar	7	2.888.439	412.634	0,4921
Ambiente	20	174.156.609	8.707.831	< 0,0001
Cult. x Amb.	140(90)	62.530.916	446.649	< 0,0001
<b>Método de regressão linear simples</b>				
Heterogeneidade	7	658.098	94.014	0,9845
Resíduo comb.	133	61.872.818	465.209	< 0,0001
<b>Método de regressão linear segmentada</b>				
Heter. R(X <sub>1</sub> ,X <sub>2</sub> )	14	24.810.218	1.772.158	< 0,0001
Heter. R(X <sub>1</sub> )	7	658.098	94.014	
Heter. R(X <sub>2</sub>  X <sub>1</sub> )	7	24.152.120	3.450.303	< 0,0001
Resíduo comb.	126	37.720.698	299.371	< 0,0001
Erro combinado	882(557)		22.965,2	

Média geral: 2.023,6 kg/ha.

Coefficiente de variação: 21,2%.

<sup>1</sup> Entre parênteses, números de graus de liberdade ajustados para levar em conta a heterogeneidade do erro experimental entre ambientes (Pimentel-Gomes, 1990).

de variação constante da resposta em relação ao incremento do índice de ambiente para as oito cultivares.

Essa suspeita foi confirmada pelo ajustamento de curvas polinomiais quadráticas. Os gráficos destas curvas, apresentados na Fig. 2, revelam, claramente, que as oito cultivares não apresentaram comportamentos semelhantes da variação do rendimento com o índice de ambiente. De fato, eles indicam que as cultivares tiveram dois distintos padrões de comportamento: as cultivares Pratão Precoce, Batatais e IAC 25 mostraram taxas de variação crescentes, enquanto as cultivares IAC 5032, IAC 1246, IAC 5544, IAC 1131 e IAC 47 tiveram taxas de variação decrescentes.

Dessa forma, a aplicação do método de regressão linear simples conduziu a uma falsa identificação de semelhança de comportamento das respostas das oito cultivares à variação ambiental.

#### **Análise pelo método de regressão linear segmentada**

A decomposição da soma de quadrados da

interação genótipo x ambiente nos componentes devidos às diferenças entre as retas segmentadas ajustadas para as oito cultivares e ao correspondente resíduo combinado também é mostrada na Tabela 2. Observa-se que a heterogeneidade das linhas de regressão torna-se altamente significativa ( $P < 0,0001$ ). Os desvios da regressão (resíduo combinado) são reduzidos, apesar de ainda revelarem elevada significância.

A rejeição da hipótese de igualdade simultânea dos coeficientes de regressão parciais  $b_{1i}$ ,  $i=1,2,\dots,8$ , e  $b_{2i}$ ,  $i=1,2,\dots,8$ , indica a adequabilidade do método de regressão linear segmentada. Por sua vez, a rejeição ( $P < 0,0001$ ) da hipótese de igualdade dos coeficientes de regressão parciais  $b_{2i}$ ,  $i=1,2,\dots,8$ , também revelada pelos resultados na Tabela 2, salienta que a análise da adaptabilidade e estabilidade deve considerar a possibilidade de alteração da taxa de variação do rendimento dos genótipos entre os ambientes desfavoráveis e favoráveis. Portanto, o modelo de regressão linear segmentada é mais apropriado do que o modelo de regressão linear

**TABELA 3. Estimativas dos parâmetros de estabilidade fenotípica e adaptabilidade, segundo o método de regressão linear simples de Finlay & Wilkinson (1963) e Eberhart & Russell (1966), para cada uma das oito cultivares.**

Cultivar	Rendimento <sup>1</sup> (kg/ha)	$\bar{b}$ <sup>2</sup>	$S_d^2$ <sup>3</sup>
Pratão Precoce	2.076	0,896	596.981 **
Batatais	2.087	1,000	670.297 **
IAC 25	2.276	0,917	669.405 **
IAC 5032	1.932	1,009	186.472 **
IAC 1246	1.877	1,043	188.938 **
IAC 5544	1.908	1,080	225.313 **
IAC 1131	1.908	1,064	260.168 **
IAC 47	2.125	0,992	275.171 **

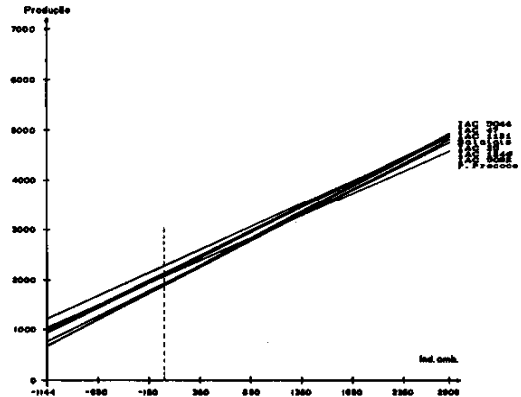
<sup>1</sup>Os rendimentos médios das cultivares não diferiram significativamente ( $\alpha=0,05$ ), pelo teste *dms* de Fisher.

<sup>2</sup>As estimativas dos coeficientes de regressão não diferiram significativamente de um e entre si ( $\alpha=0,05$ ), pelo teste *t* e pelo teste *dms* de Fisher, respectivamente.

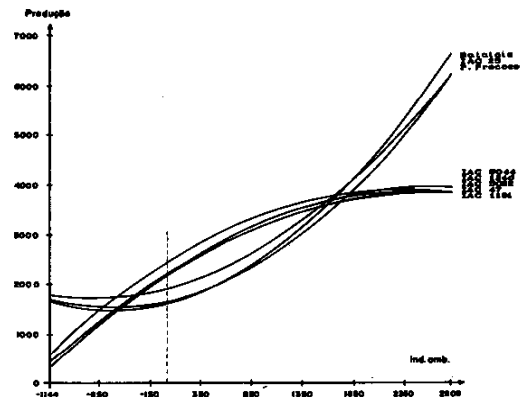
<sup>3</sup>\*\* indica desvio da regressão linear significativo ( $P<0,01$ ).

simples, que, no presente caso, revelou-se inadequado.

As estimativas dos parâmetros de adaptabilidade do modelo de regressão linear segmentada, para cada uma das cultivares, são apresentadas na Tabela 4. Os gráficos das retas segmentadas para as oito cultivares estão na Fig. 3. Esta Figura corrobora o agrupamento das oito cultivares nos dois distintos tipos de comportamento do rendimento indicados pelo ajustamento de curvas polinomiais quadráticas. As Figs. 4 e 5 destacam os gráficos das retas segmentadas para uma cultivar de cada um dos dois grupos, superpostos pelos respectivos diagramas de dispersão das médias observadas.



**FIG. 1. Representação gráfica das equações de regressão lineares simples ajustadas para as oito cultivares de arroz de sequeiro.**



**FIG. 2. Representação gráfica das equações polinomiais quadráticas/ajustadas para representar a relação entre rendimento e índice de ambiente para cada uma das oito cultivares de arroz de sequeiro.**

Os rendimentos médios das cultivares nos ambientes desfavoráveis e nos ambientes favoráveis e os resultados dos correspondentes testes de comparações múltiplas também são apresentados na Tabela 4. Esses resultados revelam que as cultivares não se distinguiram significativamente quanto ao rendimento médio nos ambientes favoráveis e globalmente em todos os 21 ambientes. Entretanto, mostram diferenças de rendimento significativas nos

ambientes desfavoráveis. Os desvios das regressões foram significativos ( $P < 0,01$ ) para todas as oito cultivares.

Esse último resultado salienta que uma parte considerável da variação do rendimento não é atribuível à relação linear segmentada entre rendimento e índice de ambiente. As significâncias dos desvios podem ser indicativas de instabilidade do rendimento nos ambientes desfavoráveis ou nos ambientes favoráveis, ou de inadequação do modelo estatístico postulado, ou ainda, de falha do índice de ambiente na representação da produtividade do ambiente. Essa falha pode decorrer de diferenças de comportamento das cultivares em relação a características específicas do ambiente (Knight, 1970).

Observe-se, entretanto, que uma análise de resíduos (Cook & Weisberg, 1982; Machado, 1991) aplicada aos desvios das regressões, para cada uma das oito cultivares, não revelou presença de pontos discrepantes, o que reforça a adequação do modelo linear segmentado, já indicada pelos resultados dos testes de hipóteses reportados na Tabela 2.

Os resultados dos testes das hipóteses parciais referentes aos parâmetros  $b_{ii}$ ,  $i=1,2,\dots,C$ , apresentados na Tabela 5, revelam que as cultivares Prato Precoce, Batatais e IAC 25 não foram responsivas ( $P > 0,05$ ) nos ambientes desfavoráveis, ao passo que as demais cultivares, ou seja, IAC 5032, IAC 1246, IAC 5544, IAC 1131 e IAC 47, mostraram taxas de variação do rendimento altamente significativas ( $P < 0,0001$ ) nesses

**TABELA 4.** Estimativas dos parâmetros de adaptabilidade, segundo o método de regressão linear segmentada (Silva & Barreto, 1986; Silva, 1995), para cada uma das oito cultivares.

Cultivar	Rendimento Médio (kg/ha) <sup>1</sup>			$\hat{b}_1$ <sup>2</sup>	$\hat{b}_2$ <sup>2</sup>	$\hat{b}_1 + \hat{b}_2$ <sup>2</sup>	$S_d^2$ <sup>3</sup>
	Global	Amb. desfavor.	Amb. favor.				
P. Precoce	2.076a	1.663 ab	2.626a	- 0,368a	1,957a	1,589a	329.663 **
Batatais	2.087a	1.590 abc	2.749a	- 0,295a	2,004a	1,709a	392.426 **
IAC 25	2.276a	1.836 a	2.863a	- 0,161a	1,669a	1,508a	488.490 **
IAC 5032	1.932a	1.099 cd	3.043a	1,645 b	- 0,985 b	0,660 b	121.677 **
IAC 1246	1.877a	991 d	3.058a	1,720 b	- 1,047 b	0,673 b	114.332 **
IAC 5544	1.908a	981 d	3.143a	1,801 b	- 1,117 b	0,684 b	140.801 **
IAC 1131	1.908a	974 d	3.153a	1,821 b	- 1,173 b	0,648 b	167.571 **
IAC 47	2.125a	1.288 bcd	3.241a	1,837 b	- 1,308 b	0,529 b	156.914 **
Global	2.024	1.303	2.985				
N <sup>o</sup> de amb.	21	12	9				

<sup>1</sup> Numa mesma coluna, rendimentos médios não seguidos de uma mesma letra diferiram significativamente, pelo teste dms de Fisher ( $\alpha=0,05$ ).

<sup>2</sup> Estimativas dos parâmetros de adaptabilidade não seguidas de uma mesma letra diferiram significativamente, pelo teste dms de Fisher ( $\alpha=0,05$ ).

<sup>3</sup> \*\* indica desvio da regressão linear significativo ( $P < 0,01$ ).

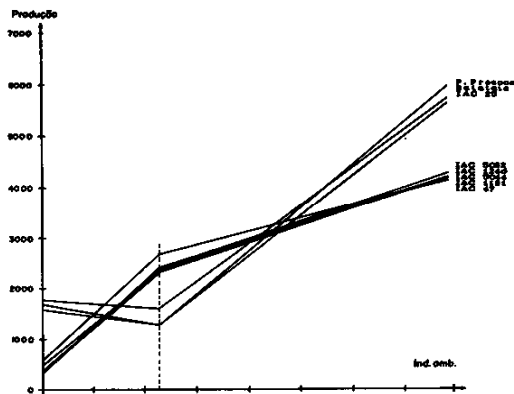


FIG.3. Representação gráfica das equações de regressão lineares segmentadas/ajustadas para as oito cultivares de arroz de sequeiro.

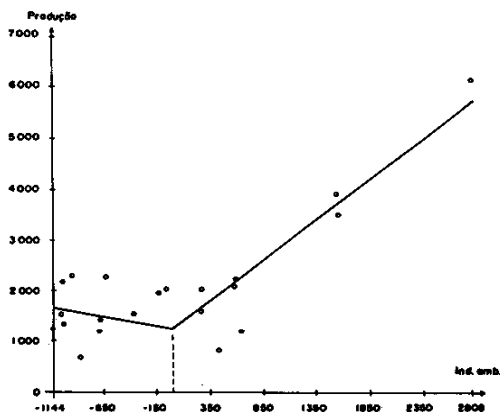


FIG.4. Representação gráfica da equação de regressão linear segmentada/ajustada e das médias ambientais observadas para a cultivar Pratião Precoce.

ambientes. Os resultados dos testes das hipóteses parciais referentes aos parâmetros  $b_{2i}$ ,  $i=1,2,\dots,C$ , apresentados na mesma Tabela 5, revelam significância ( $P<0,05$ ) das alterações de comportamento do rendimento entre os ambientes desfavoráveis e favoráveis para todas as oito cultivares.

Observe-se que os resultados do teste da hipótese de nulidade da soma dos parâmetros  $b_{1i}$  e  $b_{2i}$  para cada cultivar ( $i=1,2,\dots,C$ ), não reportados aqui,

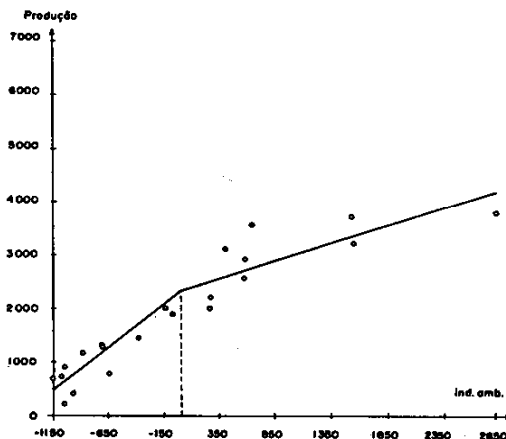


FIG. 5. Representação gráfica da equação de regressão linear segmentada/ajustada e das médias ambientais observadas para a cultivar IAC 5032.

revelaram que todas as oito cultivares foram responsivas nos ambientes favoráveis.

Os resultados dos testes da hipótese de igualdade dos coeficientes de regressão parciais  $b_{1i}$ ,  $i=1,2,\dots,8$ , e da hipótese de igualdade das somas dos coeficientes de regressão parciais,  $b_{1i}+b_{2i}$ ,  $i=1,2,\dots,8$  (ou seja, testes de homogeneidade das declividades dos segmentos de reta nos ambientes desfavoráveis e nos ambientes favoráveis, respectivamente) encontram-se nas Tabelas 6 e 7. Esses dois resultados altamente significativos ( $P<0,0001$ ) revelam que as cultivares se distinguiram quanto ao comportamento da resposta com a variação do ambiente, tanto nos ambientes desfavoráveis como nos ambientes favoráveis.

Esses resultados tornam interessantes as comparações das taxas de variação dos rendimentos das oito cultivares nos ambientes desfavoráveis e nos ambientes favoráveis e, também, das diferenças de taxas de variação entre esses dois subespaços de ambientes.

As estimativas das variâncias e da covariância dos estimadores dos coeficientes de regressão parciais  $b_{1i}$  e  $b_{2i}$  e da soma das variâncias desses estimadores, para cada uma das oito cultivares, estão



**TABELA 5. Testes das hipóteses parciais referentes aos parâmetros  $b_1$  e  $b_2$  do modelo linear segmentado e teste de significância do desvio da regressão, para cada cultivar.**

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Prob.>F
<b>Pratão Precoce</b>				
X <sub>1</sub>	1	399.201	399.201	0,3014
X <sub>2</sub>	1	5.431.678	5.431.678	0,0010
Resíduo	18	6.347.298	352.628	< 0,0001
<b>Batatais</b>				
X <sub>1</sub>	1	255.323	255.323	0,4432
X <sub>2</sub>	1	5.694.937	5.694.937	0,0016
Resíduo	18	7.477.039	415.391	< 0,0001
<b>IAC 25</b>				
X <sub>1</sub>	1	76.252	76.252	0,7039
X <sub>2</sub>	1	3.948.822	3.948.822	0,0124
Resíduo	18	9.206.198	511.455	< 0,0001
<b>IAC 5032</b>				
X <sub>1</sub>	1	7.955.681	7.955.681	< 0,0001
X <sub>2</sub>	1	1.375.734	1.375.734	0,0064
Resíduo	18	2.603.563	144.642	< 0,0001
<b>IAC 1246</b>				
X <sub>1</sub>	1	8.695.205	8.695.205	< 0,0001
X <sub>2</sub>	1	1.554.825	1.554.825	0,0034
Resíduo	18	2.471.339	137.297	< 0,0001
<b>IAC 5544</b>				
X <sub>1</sub>	1	9.536.545	9.536.545	< 0,0001
X <sub>2</sub>	1	1.769.491	1.769.491	0,0041
Resíduo	18	2.947.786	163.766	< 0,0001
<b>IAC 1131</b>				
X <sub>1</sub>	1	9.751.206	9.751.206	< 0,0001
X <sub>2</sub>	1	1.949.881	1.949.881	0,0050
Resíduo	18	3.429.649	190.536	< 0,0001
<b>IAC 47</b>				
X <sub>1</sub>	1	9.922.865	9.922.865	< 0,0001
X <sub>2</sub>	1	2.426.751	2.426.751	0,0017
Resíduo	18	3.237.825	179.879	< 0,0001
Erro Combinado	(882) 557		22.965,2	

na Tabela 8. Como o quociente da maior para a menor das estimativas de variâncias dos estimadores de cada um dos parâmetros  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_1+b_2$  é inferior a 7, pode-se admitir a homogeneidade da variância dos estimadores de cada um desses parâmetros (Pimentel-Gomes, 1990) e adotar as correspondentes

estimativas médias, constantes da última linha da Tabela 8.

Os resultados das comparações das taxas de variação dos rendimentos nos ambientes desfavoráveis e nos ambientes favoráveis e das alterações dos comportamentos dos rendimentos

**TABELA 6. Teste da hipótese de igualdade dos coeficientes de regressão parciais  $b_{1i}$ ,  $i=1, 2, \dots, 8$ , do modelo de regressão linear segmentada.**

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Prob.>F
Hipótese $H_0$	7	23.072.873	3.296.125	< 0,0001
Resíduo	126	37.720.698	299.371	
Resíduo ( $H_0$ )	133	60.793.571		

**TABELA 7. Teste da hipótese de igualdade das somas dos coeficientes de regressão parciais,  $b_{1i} + b_{2i}$ ,  $i=1, 2, \dots, 8$ , do modelo de regressão linear segmentada.**

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Prob.>F
Hipótese $H_0$	7	13.216.006	1.888.001	< 0,0001
Resíduo	126	37.720.698	299.371	
Resíduo ( $H_0$ )	133	50.936.704		

entre estes dois subespaços de ambientes, pelo *teste dms* de Fisher, são apresentados na Tabela 4. Esses resultados destacam a caracterização, já indicada anteriormente, de dois grupos de cultivares quanto à sensibilidade de resposta à variação ambiental em ambientes desfavoráveis e em ambientes favoráveis e à alteração de sensibilidade de resposta entre estes dois subespaços de ambientes:

Grupo 1: Pratao Precoce, Batatais e IAC 25;

Grupo 2: IAC 5032, IAC 1246, IAC 5544, IAC 1131 e IAC 47.

Observe-se, finalmente, que os testes das hipóteses  $b_{1i} = 1$  e  $b_{1i} + b_{2i} = 1$  para cada cultivar ( $i=1, 2, \dots, 8$ ), cujos resultados não são reportados aqui, mostraram que as cultivares do Grupo 1 apresentaram taxa de resposta abaixo da média nos ambientes desfavoráveis, e as do Grupo 2, taxa de resposta acima da média, ao passo que nos ambientes favoráveis os comportamentos dos rendimentos das

cultivares desses dois grupos se inverteram relativamente ao comportamento médio das oito cultivares.

Estes últimos resultados conduzem à classificação das cultivares dos Grupos 1 e 2 nas categorias de sensibilidade de resposta mais desejáveis e mais indesejáveis, respectivamente, segundo a classificação de padrões de resposta de Silva (1995).

## DISCUSSÃO

O método de regressão linear simples de Finlay & Wilkinson (1963) e Eberhart & Russell (1966) pressupõe taxa de variação constante do rendimento em relação ao índice de ambiente, ou seja, igual sensibilidade de resposta do genótipo ao incremento do índice de ambiente em todas as faixas de produtividade do ambiente. De fato, essa propriedade pode ser induzida pela linearidade da resposta média dos genótipos em relação ao índice de ambiente, em algumas circunstâncias de comportamento da resposta dos genótipos. Entretanto, em geral, a taxa de variação da produtividade individual dos genótipos pode não ser constante. Ela pode variar dos ambientes mais desfavoráveis para os mais favoráveis, assumindo qualquer uma das nove combinações de taxa de variação abaixo da média, taxa de variação média e taxa de variação acima da média nos ambientes desfavoráveis e favoráveis (Silva, 1995).

O método de regressão linear simples não distingue esses diversos padrões de resposta.

A análise dos dados do experimento de comparação de cultivares de arroz de sequeiro ilustra uma circunstância em que o método de regressão linear simples falha na caracterização e comparação de sensibilidades de resposta de cultivares.

Segundo Silveira & Vencovsky (1988), as oito cultivares compreendem dois distintos grupos quanto à duração do ciclo vegetativo: Pratao Precoce, Batatais e IAC 25, de ciclo curto, com 90 dias de duração do crescimento, e IAC 47, IAC 1246, IAC 5544, IAC 1131 e IAC 5032, de ciclo médio, com duração de crescimento entre 110 e 130 dias. A região de cultivo de arroz de sequeiro no Estado de São Paulo tem uma estação chuvosa justamente no período de cultivo, ou seja, entre outubro (época de

**TABELA 8.** Estimativas das variâncias, da covariância e da variância da soma das estimativas dos coeficientes de regressão parciais  $b_1$  e  $b_2$  do modelo de regressão linear segmentada, para cada uma das oito cultivares.

Cultivar	$\hat{\text{Var}}(\hat{b}_1)$	$\hat{\text{Var}}(\hat{b}_2)$	$\hat{\text{Cov}}(\hat{b}_1, \hat{b}_2)$	$\hat{\text{Var}}(\hat{b}_1 + \hat{b}_2)$ <sup>1</sup>
Pratão Precoce	0,119921	0,248674	-0,160601	0,047394
Batatais	0,141272	0,292947	-0,189194	0,055830
IAC 25	0,173938	0,360685	-0,232941	0,068739
IAC 5032	0,049222	0,102068	-0,065919	0,019452
IAC 1246	0,046687	0,096812	-0,062524	0,018451
IAC 5544	0,055686	0,115474	-0,074576	0,022009
IAC 1131	0,064799	0,134371	-0,086781	0,025608
IAC 47	0,061203	0,126914	-0,081965	0,024187
Média	0,089091	0,184743	-0,119312	0,035209

$$^1 \hat{\text{Var}}(\hat{b}_1 + \hat{b}_2) = \hat{\text{Var}}(\hat{b}_1) + \hat{\text{Var}}(\hat{b}_2) + 2\hat{\text{Cov}}(\hat{b}_1, \hat{b}_2)$$

plântio) e março. Entretanto, períodos de seca de até 10 dias, conhecidos como *veranicos*, ocorrem em 13 de cada 20 anos, durante os meses de janeiro e fevereiro, podendo causar danos severos à cultura do arroz nos estágios de reprodução e maturação. Essas restrições climáticas foram particularmente danosas ao rendimento do arroz de sequeiro no Estado de São Paulo, no período de 1974 a 1977. Possivelmente, o ciclo curto das cultivares Pratão Precoce, Batatais e IAC 25 contribuiu para a redução dos danos decorrentes do *veranico* e, também, dos danos da incidência da *bruzone* (blast disease) sobre o rendimento de grãos (Silveira & Vencovsky, 1988).

Essa pode ser uma explicação para os elevados desvios da linearidade. De fato, Silveira (1980) salienta, em suas conclusões, que a experimentação simultânea de cultivares de ciclo curto e de ciclo médio, associada à época de semeadura da maioria dos ensaios, em fins de outubro e início de novembro, foi a principal causa da elevada variabilidade da

produção de grãos de arroz de sequeiro.

O ajustamento de curvas polinomiais quadráticas revelou a caracterização de dois distintos comportamentos de resposta das oito cultivares, coincidentes com os dois grupos de classificação das cultivares quanto ao ciclo.

O método de regressão linear segmentada (Silva & Barreto, 1986; Silva, 1995) permitiu a caracterização objetiva dos comportamentos individuais das respostas das oito cultivares nesses mesmos dois grupos, segundo os resultados das Tabelas 4 e 5:

1) As cultivares Pratão Precoce, Batatais e IAC 25 não responderam significativamente ( $\alpha=0,05$ ) à variação ambiental nos ambientes desfavoráveis e tiveram aumento significativo ( $P<0,0001$ ) da taxa de resposta nos ambientes favoráveis.

2) As cultivares IAC 5032, IAC 1246, IAC 5544, IAC 1131 e IAC 47 responderam significativamente ( $P<0,0001$ ) à variação de ambiente nos ambientes

desfavoráveis e tiveram redução de taxa de resposta significativa ( $P < 0,01$ ) nos ambientes favoráveis.

Nos ambientes desfavoráveis, os rendimentos médios das cultivares do primeiro grupo foram significativamente superiores aos rendimentos médios das cultivares do segundo grupo, excetuadas as cultivares IAC 47 e IAC 5032 em algumas comparações. Nesses ambientes, os rendimentos médios das cultivares não diferiram significativamente entre si dentro dos respectivos grupos. Nos ambientes favoráveis, os rendimentos das oito cultivares não diferiram significativamente entre si.

Tendo em conta, ademais, que as oito cultivares não diferiram significativamente quanto aos rendimentos médios globais nos 21 ambientes, esses resultados caracterizam os desempenhos das cultivares Pratao Precoco, Batatais e IAC 25 como correspondentes ao desejável e o desempenho das demais cultivares, ao indesejável.

Um aspecto crítico do conjunto de dados utilizado para ilustração é a distribuição irregular do índice de ambiente. O intervalo dos índices de ambiente foi  $[-1.143,9; 2.808,3]$ ; sua mediana e seu ponto meio foram, respectivamente,  $-131,9$  e  $832,2$ , e apenas três dos 21 índices de ambiente foram superiores a esse ponto meio. Ademais, o extremo superior desse intervalo distanciou-se do índice de ambiente imediatamente inferior por  $1.254,2$  unidades, valor próximo de um terço da amplitude total do intervalo.

Essa distribuição irregular do índice de ambiente pode ser indicativa de falha de representatividade dos ambientes de interesse pelos locais e anos de condução do experimento, ou de falhas na condução do experimento. Essa suspeita poderia ser verificada pela inspeção das condições dos ambientes de condução do experimento e sua contrastação com a gama de ambientes da região de interesse, e pelo exame de outras ocorrências relevantes.

As estimativas dos parâmetros de estabilidade fenotípica e adaptabilidade podem refletir influência dessa distribuição irregular dos índices de ambiente, especialmente na presença de valores discrepantes. Uma análise de resíduos pode ser muito útil para a detecção de ambientes discrepantes e influentes (Silva, 1995). No presente caso, entretanto, não foram revelados valores discrepantes. Mesmo assim, foi efetuada uma reanálise com a exclusão do

ambiente mais influente, correspondente ao índice de ambiente mais elevado. Essa nova análise mostrou que as significâncias das diferenças entre as cultivares no que se refere à taxa de resposta nos ambientes desfavoráveis e à alteração da taxa de resposta entre os ambientes desfavoráveis e favoráveis permaneceram inalteradas. Entretanto, as diferenças de taxa de resposta nos ambientes favoráveis tornaram-se não-significativas.

O aprofundamento dessa discussão e a derivação de conclusões referentes ao experimento particular utilizado para ilustração demandariam informações detalhadas sobre as condições ambientais e as ocorrências relevantes durante a condução do experimento nos 21 ambientes. Entretanto, esse não é o objetivo do presente artigo.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

1. O método de regressão linear simples não é capaz de caracterizar e distinguir diferenças de comportamento das respostas de genótipos entre ambientes desfavoráveis e favoráveis. Portanto, ele não permite a identificação de genótipos desejáveis, ou seja, genótipos responsivos a ambientes favoráveis ou melhorados e que mantenham rendimentos razoáveis em ambientes adversos.

2. O método de regressão linear segmentada permite caracterizar e distinguir essas diferenças de comportamento das respostas. Particularmente, ele permite a identificação e classificação de genótipos nas diversas categorias de resposta correspondentes às diferentes combinações de taxas de resposta baixa, média e elevada nos ambientes desfavoráveis e favoráveis.

3. Desvios da regressão elevados podem ser uma indicação de inadequabilidade do modelo linear postulado para representar a relação entre rendimento e índice de ambiente. Portanto, desvios da regressão devem ser considerados com cautela na avaliação da estabilidade fenotípica.

4. A representação da produtividade do ambiente pelo índice de ambiente pode distorcer e confundir efeitos de características específicas do ambiente sobre o rendimento. Esse fato deve ser levado em conta na interpretação de resultados de estudos de estabilidade fenotípica e adaptabilidade ao ambiente.

5. A interpretação dos resultados e a derivação de conclusões de estudos de estabilidade e adaptabilidade demandam a consideração das características ambientais relevantes, especialmente das que possam ter efeitos limitantes sobre o rendimento.

6. Ajustamentos de regressão podem ser influenciados pelos desempenhos de genótipos em relativamente poucos ambientes e pela distribuição irregular dos índices de ambiente. Uma análise de resíduos pode ser útil, particularmente para a identificação de ambientes que mereçam inspeção mais cuidadosa.

7. Como qualquer técnica de modelagem estatística, a análise de adaptabilidade e estabilidade através de regressão linear segmentada pode falhar. Dessa forma, essa abordagem deve ser considerada como uma adição aos recursos de técnicas que o melhorista pode utilizar no processo de decisão de um programa de melhoramento genético.

8. Inferências referentes à estabilidade e adaptabilidade podem ser consideravelmente influenciadas pelas cultivares incluídas no experimento e pelos ambientes (locais e anos) de condução do experimento. Portanto, a caracterização da estabilidade fenotípica e adaptabilidade ao ambiente pode variar quando o genótipo é contrastado com um diferente conjunto de genótipos, e as inferências devem se restringir a ambientes que possam ser considerados representados pelos locais e anos de execução do experimento.

9. Estudos de estabilidade e adaptabilidade são usualmente baseados em dados de experimentos não planejados para tal propósito. Nessas circunstâncias, devem ser mais apropriadamente considerados como estudos descritivos e exploratórios, e fornecedores de subsídios para programas de melhoramento genético.

10. Tendo em conta que programas de melhoramento genético, em geral, têm como objetivo a obtenção de genótipos com características desejáveis de adaptabilidade ao ambiente, é recomendável que a análise de adaptabilidade faça parte dos critérios de avaliação periódica com vistas à recomendação de cultivares para cultivo e à continuidade do programa. Sua execução em cada etapa de avaliação do programa pode propiciar, também, indicações para as apropriadas alterações

de locais e número de anos de execução do experimento.

## REFERÊNCIAS

- COCHRAN, W.G. The combination of estimates from different experiments. *Biometrics*, v.10, n.1, p.101-129, 1954.
- COOK, R.D.; WEISBERG, S. *Residuals and influence in regression*. New York: Chapman and Hall, 1982. 230p.
- EASTON, H.S.; CLEMENTS, R.J. The interaction of wheat genotypes with a specific factor of the environment. *Journal of Agricultural Science*, Cambridge, v.80, p.43-52, 1973.
- EBERHART, S.A.; RUSSELL, W.A. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, Madison, v.6, p.36-40, 1966.
- FINLAY, K.W.; WILKINSON, G.N. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Australian Journal of Agricultural Research*, Victoria, v.14, p.742-754, 1963.
- FREEMAN, G.H. Statistical methods for the analysis of genotype-environment interactions. *Heredity*, Edinburgh, v.31, n.3, p.339-354, 1973.
- KNIGHT, R. The measurement and interpretation of genotype environment interactions. *Euphytica*, v.19, p.225-235, 1970.
- MACHADO, A.A. *Modelos Lineares*. Piracicaba: Departamento de Matemática e Estatística, ESALQ/USP, 1991. 335p. Monografia.
- NOR, K.M.; CADY, F.B. Methodology for identifying wide adaptability in crops. *Agronomy Journal*, v.71, p.556-559, 1979.
- PERKINS, J.M.; JINKS, J.L. Environmental and genotype-environmental components of variability. III. Multiple lines and crosses. *Heredity*, Edinburgh, v.23, p.339-356, 1968.
- PIMENTEL-GOMES, F. *Curso de Estatística Experimental*. 13. ed. São Paulo: Livraria Nobel, 1990. 467 p.
- SAS INSTITUTE INC. *SAS User's Guide: Statistics*. Version 5. Cary, NC: SAS Institute Inc., 1985. 956 p.
- SILVA, J.G.C. da. Análise da adaptabilidade através de regressão linear segmentada: I. Fundamentos.

- Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n.4, p.435-448, 1995.
- SILVA, J.G.C. da; BARRETO, J.N. An application of segmented linear regression to the study of genotype x environment interaction. **Biometrics**, v.41, n.4, p.1093, 1986.
- SILVEIRA, E.P. **Interação genótipos por locais em arroz de sequeiro (*Oryza sativa* L.) no Estado de São Paulo**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1980. 97p. Dissertação de Mestrado.
- SILVEIRA, E.P.; VENCOSKY, R. Interaction of genotypes and environment for grain yield in upland rice. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.23, n.12, p.1407-1412, 1988.
- VERMA, M.M.; CHAAL, G.S.; MURTY, B.R. Limitations of conventional regression analysis. A proposed modification. **Theoretical and Applied Genetics**, v.53, p.89-91, 1978.
- WITCOMBE, J.R.; WHITTINGTON, W.J. A study of genotype by environment interaction shown by germinating seeds of *Brassica napus*. **Heredity**, Londres, v.26, p.397-411, 1971.
- WRIGHT, A.J. The analysis and prediction of some two-factor interactions in grass breeding. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 76, p.301-306, 1971.
- YATES, F.; COCHRAN, W.G. The analysis of groups of experiments. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.28, p.556-580, 1938.