

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
 ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"
 DEPARTAMENTO DE GENÉTICA
 LGN0313 – Melhoramento Genético



O Equilíbrio de Hardy-Weinberg e a Seleção

Prof. Fernando Angelo Píotto

fpiotto@gmail.com.br

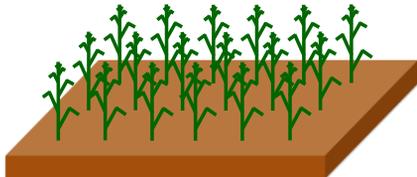
Piracicaba, 20 de maio de 2016

Introdução

- **População:** "Comunidade reprodutiva composta de organismos de fertilização cruzada, os quais participam de um mesmo conjunto de genes" (Dobzhansky, 1951)
- **População:** Conjunto de indivíduos da mesma espécie, que ocupam o mesmo local, apresentam uma continuidade no tempo e possuem a capacidade de se intercasalar ao acaso e, portanto, de trocar genes entre si

Estrutura Genética

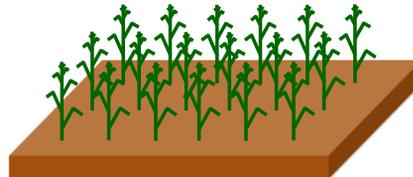
- **Populações de plantas**



Estrutura Genética

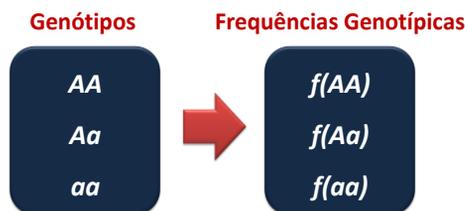
- **Propriedades de uma população:**

- Frequências genotípicas
- Frequências alélicas



Estrutura Genética

- Considerando um loco com 2 alelos (A e a)



Frequências Genotípicas

Tamanho da população (N)

AA (D) : Aa (H) : aa (R)

$$f(AA) = D / N$$

$$f(Aa) = H / N$$

$$f(aa) = R / N$$

Frequências Genotípicas

- Ex.: População com 1000 indivíduos

490 plantas = AA

420 plantas = Aa

90 plantas = aa



Frequências Genotípicas

$$f(AA) = 0,49$$

$$f(Aa) = 0,42$$

$$f(aa) = 0,09$$

Frequências Alélicas

- Ex.: População com 1000 indivíduos

$$f(A) = f(AA) + \frac{1}{2} f(Aa) = 0,49 + \frac{1}{2} 0,42 = 0,70$$

$$f(a) = f(aa) + \frac{1}{2} f(Aa) = 0,09 + \frac{1}{2} 0,42 = 0,30$$

Frequências Alélicas

- Ex.: População com 1000 indivíduos

$$f(A) = f(AA) + \frac{1}{2} f(Aa)$$

$$f(a) = f(aa) + \frac{1}{2} f(Aa)$$

Frequências Alélicas

- Ex.: População com 1000 indivíduos

$$f(A) = f(AA) + \frac{1}{2} f(Aa) = 0,49 + \frac{1}{2} 0,42 = 0,70$$

$$f(a) = f(aa) + \frac{1}{2} f(Aa) = 0,09 + \frac{1}{2} 0,42 = 0,30$$

$$f(A) = 0,70$$

$$f(a) = 0,30$$

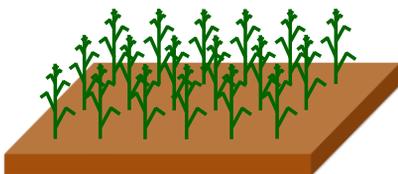
Frequências Alélicas

Estrutura Genética

Gametas { ♂
♀

$$f(A) = p$$

$$f(a) = q$$



Estrutura Genética

- Supondo 1 loco com dois alelos:

Alelos	Frequências Alélicas	
A	f(A)	f(A) = p
a	f(a)	f(a) = q

Onde, $p + q = 1$

Estrutura Genética

- Troca de genes ao acaso (cruzamentos ao acaso)

		Gametas Masculinos ♂	
		$f(A) = p$	$f(a) = q$
Gametas Femininas ♀	$f(A) = p$	$f(AA) = p^2$	$f(Aa) = pq$
	$f(a) = q$	$f(Aa) = pq$	$f(aa) = q^2$

Estrutura Genética

Genótipos	Frequências Genotípicas
AA	$f(AA) = p^2$
Aa	$f(Aa) = 2pq$
aa	$f(aa) = q^2$

$$\text{Onde, } p^2 + 2pq + q^2 = 1$$

O Equilíbrio de Hardy-Weinberg

- Em população **infinitamente grande**, as **frequências** genotípicas e alélicas **permanecerão constantes** no decorrer das gerações, a não ser que haja, seleção, acasalamento não ao acaso, migração ou mutação

$$p^2 + 2pq + q^2 = 1$$

O Equilíbrio de Hardy-Weinberg

- **Consequências na práticas**
 - Trabalhar com amostras
 - Multiplicação de populações melhoradas
 - Aumento na média de populações
 - Aumento da frequência de alelos e indivíduos desejados

Estrutura Genética

- **População está em equilíbrio de HW?**

500 plantas AA	$f(AA) = 0,49$
200 plantas Aa	$f(Aa) = 0,42$
300 plantas aa	$f(aa) = 0,09$
	$f(A) = p = 0,60$
	$f(a) = q = 0,40$

Acasalamentos ao acaso

- **População está em equilíbrio de HW?**

$$f(A) = p = 0,60$$

$$f(a) = q = 0,40$$

$$f(AA) = p^2 = 0,60^2 = 0,36$$

$$f(Aa) = 2pq = 2 \times 0,60 \times 0,40 = 0,48$$

$$f(aa) = q^2 = 0,40^2 = 0,16$$

Acasalamentos ao acaso

- **População está em equilíbrio de HW?**

Frequências Observadas Frequências Esperadas

$$f(AA) = 0,50$$

$$f(Aa) = 0,20$$

$$f(aa) = 0,30$$

$$f(AA) = 0,36$$

$$f(Aa) = 0,48$$

$$f(aa) = 0,16$$

Necessário verificar as hipóteses por meio de testes estatísticos

Acasalamentos ao acaso

- **Cruzamentos ao acaso entre os indivíduos da população**
 - Cada planta: 10 gametas masculinos e 10 gametas femininos

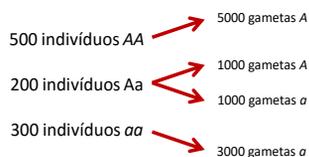
500 indivíduos AA

200 indivíduos Aa

300 indivíduos aa

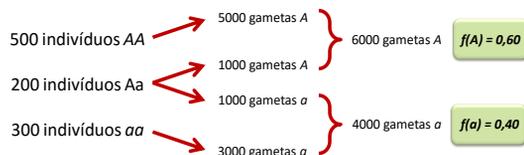
Estrutura Genética

- **Cruzamentos ao acaso entre os indivíduos da população**
 - Cada planta: 10 gametas masculinos e 10 gametas femininos



Estrutura Genética

- **Cruzamentos ao acaso entre os indivíduos da população**
 - Cada planta: 10 gametas masculinos e 10 gametas femininos



Estrutura Genética

		Gametas Masculinos	
		$f(A) = 0,6$	$f(a) = 0,4$
Gametas Femininos	$f(A) = 0,6$	0,36	0,24
	$f(a) = 0,4$	0,24	0,16

$$f(AA) = 0,36 \quad f(Aa) = 0,48 \quad f(aa) = 0,16$$

Acasalamentos ao acaso

- **Se a população não estiver em equilíbrio, é necessária somente uma geração de cruzamentos ao acaso para que ela volte ao equilíbrio**
- **Próxima geração**
 - AA = 360 indivíduos = $f(AA) = 0,36$
 - Aa = 480 indivíduos = $f(Aa) = 0,48$
 - aa = 160 indivíduos = $f(aa) = 0,16$

Estrutura Genética

- População está em equilíbrio de HW?

Frequências Observadas Frequências Esperadas

$$f(AA) = 0,50$$

$$f(Aa) = 0,20$$

$$f(aa) = 0,30$$

$$f(AA) = 0,36$$

$$f(Aa) = 0,48$$

$$f(aa) = 0,16$$

Necessário verificar as hipóteses por meio de testes estatísticos

Estrutura Genética

- Considerando a população em equilíbrio

Frequências Esperadas

$$f(AA) = 0,36$$

$$f(Aa) = 0,48$$

$$f(aa) = 0,16$$

Segue o exemplo a seguir

Seleção

- Efeito da seleção em populações

Genótipos	População Original	
	Nº	Frequência
AA	360	0,36
Aa	480	0,48
aa	160	0,16
Total	1000	1,00

Seleção

- Efeito da seleção em populações

Genótipos	Após a Seleção	
	Nº	Frequência
AA	360	0,36
Aa	480	0,48
aa	0	0,00
Total	840	0,84

Seleção

- Efeito da seleção em populações

Alelos	Após a Seleção	
	Nº	Frequência
A	360 (AA)	0,715
a	480 (Aa)	0,285
Total	840	1,00

Seleção

- Efeito da seleção em populações

$$f(A) = 0,715$$

$$f(a) = 0,285$$

$$f(AA) = p^2 = 0,715^2 = 0,51$$

$$f(Aa) = 2pq = 2 \times 0,715 \times 0,285 = 0,41$$

$$f(aa) = q^2 = 0,40^2 = 0,08$$

Seleção

• Efeito da seleção em populações

$f(AA) = 0,36$	➔	$f(AA) = 0,51$
$f(Aa) = 0,48$	➔	$f(Aa) = 0,41$
$f(aa) = 0,16$	➔	$f(aa) = 0,08$

Seleção altera a frequência alélica da população

Seleção

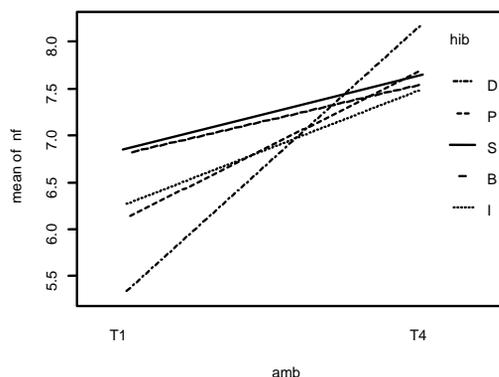
• Efeito da seleção em populações

Número de indivíduos	➔	Número de indivíduos
$AA = 360$		$AA = 510$
$Aa = 480$		$Aa = 410$
$aa = 160$		$aa = 80$

Processo se repete até que $f(AA) = 1$

Populações e o Equilíbrio de HW

- A população está em EHW?
- E após um ciclo de acasalamento ao acaso?
- Ao atingir o EHW, as frequências mudam?
- Qual é o efeito da seleção?



```
anova(lm(nf ~ hib*amb + amb:bl))
```

Referências

- Araújo PM e Paterniani E (1999) Melhoramento de plantas alógamas. In: Destro D e Montalván R (Ed.) Melhoramento genético de plantas. Editora UEL, Londrina, p. 299-341.
- Borém A e Miranda GV (2013) (6ed.) Melhoramento de plantas. Editora UFV, Viçosa, 523p. (Cap. 21)
- Cruz CD (2005) Princípios de genética quantitativa. Editora UFV, Viçosa, 394p. (Cap. 2)
- Souza Junior CL (2001) Melhoramento de espécies alógamas. In: Nass LL et al (Ed.) Recursos genéticos e melhoramento - plantas. Editora Fundação MT, Rondonópolis, p. 159-200.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"
DEPARTAMENTO DE GENÉTICA
LGN0313 – Melhoramento Genético



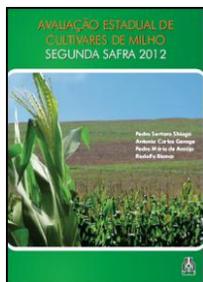
Interação Genótipo x Ambiente

Prof. Fernando Angelo Piotto

fpiozzo@gmail.com.br

Piracicaba, 20 de maio de 2016

Exemplo de Interação GxE



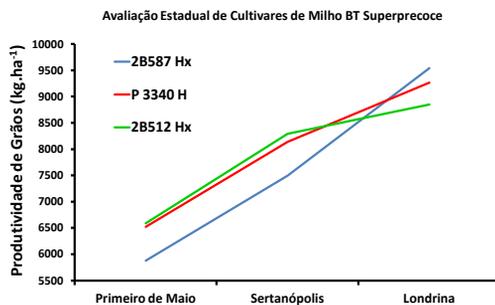
- www.iapar.br
 - Publicações do IAPAR
 - Boletim técnico
 - BT-78 – Avaliação estadual de cultivares de milho
 - Segunda Safra 2012

Tabella 8. Resultados finais do estudo de avaliação estadual de cultivares superprecoce de milho BT em diferentes locais de Iapar em 2012.

Cultivares	Altura (cm)	Alteza (cm)	Índice de maturação	Produção (kg/ha)	Teor de amido (%)	Teor de proteína (%)	Teor de fibra (%)	Teor de lignina (%)	Teor de lignocelulose (%)	Teor de lignina (g/kg)	Teor de lignocelulose (g/kg)	Teor de lignina (g/kg)	Teor de lignocelulose (g/kg)
1. 20021-96	200	220	0,80	84,7	4	7	0,38	60	21,1	8,337	2,3	3,3	
2. 20022-96	200	220	0,80	84,4	3	1	0,39	60	21,9	8,377	2,4	3,4	
3. 20023-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
4. 20024-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
5. 20025-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
6. 20026-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
7. 20027-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
8. 20028-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
9. 20029-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
10. 20030-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
11. 20031-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
12. 20032-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
13. 20033-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
14. 20034-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
15. 20035-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
16. 20036-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
17. 20037-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
18. 20038-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
19. 20039-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	
20. 20040-96	200	220	0,80	84,4	4	8	0,38	60	21,4	8,151	2,3	3,3	

http://www.iapar.br/arquivos/File/zip_pdf/BT78_Milho2012.pdf

Exemplo de Interação GxE



Introdução

- Condições edafoclimáticas
- Ocorrência de patógenos
- Ocorrência de plantas daninhas
- Práticas culturais
- Características do solo

Ambiente



= Genótipo

Cultura Agrícola

Fenótipos

Produção de Grãos
Taxa de Crescimento
Acúmulo de Biomassa

Introdução

Fenótipo = Genótipo + Ambiente

$$F = G + E$$

Cada genótipo (G) pode apresentar um desempenho relativo diferente em cada ambiente (E)

Genótipo x Ambiente

$$F = G + E + GE$$

Introdução

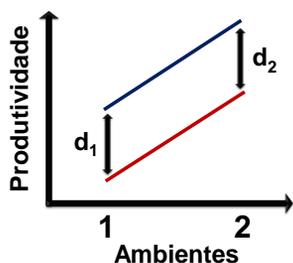
- **Importância da interação Genótipo x Ambiente**
 - Uma cultivar pode apresentar desempenhos diferentes em ambientes diferentes
 - Viés na avaliação dos ganhos de seleção
 - Dificuldade na recomendação de cultivares com ampla adaptabilidade
- **Causas da Interação**
 - Fatores fisiológicos e bioquímicos de cada genótipo

Introdução

- **Necessário avaliar sua magnitude visando:**
 - Quantificar seus efeitos sobre as técnicas de melhoramento
 - Adotar procedimentos para sua minimização ou aproveitamento
- **Tipos de Interação**
 - Ausência de Interação
 - Interação Simples
 - Interação Complexa

Tipos de Interação GxE

• Ausência de Interação



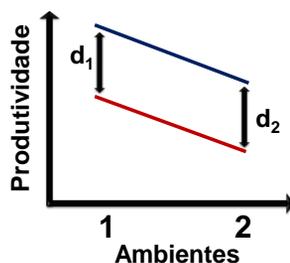
Genótipo 1

Genótipo 2

$$d_1 = d_2$$

Tipos de Interação GxE

• Ausência de Interação



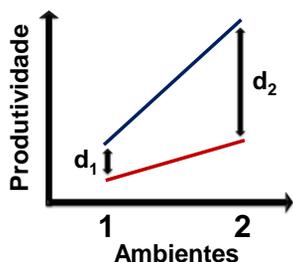
Genótipo 1

Genótipo 2

$$d_1 = d_2$$

Tipos de Interação GxE

• Interação Simples



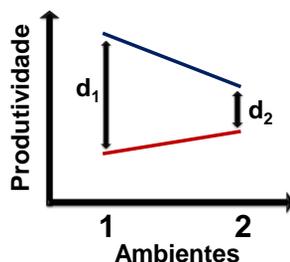
Genótipo 1

Genótipo 2

$$d_1 \neq d_2$$

Tipos de Interação GxE

• Interação Simples



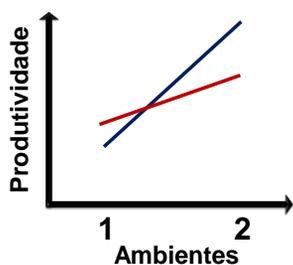
Genótipo 1

Genótipo 2

$$d_1 \neq d_2$$

Tipos de Interação GxE

• Interação Complexa



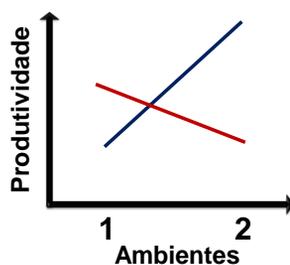
Genótipo 1

Genótipo 2

Inversão de
Performance

Tipos de Interação GxE

• Interação Complexa



Genótipo 1

Genótipo 2

Inversão de
Performance

Principais Causas da Interação GxE

- Fotoperíodo
 - Tipo de solo
 - Fertilidade do solo
 - Toxicidade por alumínio
 - Época de semeadura
 - Práticas agrícolas
- Fatores Previsíveis**
- Distribuição pluviométrica
 - Umidade relativa do ar
 - Temperatura do ar e do solo
 - Patógenos
 - Insetos
- Fatores Imprevisíveis**

Implicações da Interação GxE para o melhoramento e recomendação de cultivares

- **Ausência de Interação e Interação Simples**
 - Não interferem nos programas de melhoramento e na recomendação de cultivares
- **Objetivo do programa de melhoramento**
 - Obtenção de cultivares produtivos em um amplo espectro de ambientes

Implicações da Interação GxE para o melhoramento e recomendação de cultivares

- **Interação Complexa**
 - Interferem nos programas de melhoramento e na recomendação de cultivares
 - Programas de melhoramento precisam ser regionalizados
 - Recomendação de cultivares precisa ser específica para cada região
 - Em geral, caracteres como a produção, apresentam interação do tipo complexo

Implicações da Interação GxE para o melhoramento e recomendação de cultivares

- **Ensaio comparativos de produtividade**
 - Genótipos (G) x Locais (L)
 - Genótipos (G) x Anos (A)
 - Genótipo (G) x Locais (L) x Anos (A)
- **Alocação de recursos para os programas de melhoramento e ensaios de competição de cultivares**
 - Combinação entre número de Locais (L), Anos (A) e repetições dos ensaios de competição de cultivares

Aspectos positivos e negativos da interação GxE

- **Aspectos negativos:**
 - Regionalização dos programas de melhoramento
- **Aspectos positivos:**
 - Manutenção de diversidade
 - Redução da vulnerabilidade