



# BIOLOGIA

com Arthur Jones

Genética de populações equilíbrio  
gênico das populações  
Equilíbrio de hardy-weinberg

# GENÉTICA DE POPULAÇÕES

## EQUILÍBRIO GÊNICO DAS POPULAÇÕES

### EQUILÍBRIO DE HARDY-WEINBERG

Em uma população em que a frequência dos genes permanece constante ao longo do tempo, não ocorre evolução. Isso significa que, para que uma população não sofra mudanças evolutivas, as frequências gênicas devem permanecer estáveis, sem influências que possam alterá-las. Os principais fatores que podem modificar essas frequências são mutações, seleção natural, migrações e oscilação genética. Portanto, se nenhum desses fatores evolutivos estiver presente, a população não experimentará evolução.

No início do século XX, os cientistas Hardy e Weinberg, de forma independente, desenvolveram um modelo matemático que demonstra como, em condições ideais, na ausência dos fatores evolutivos mencionados, as frequências dos genes, sejam eles recessivos ou dominantes, não se modificam ao longo do tempo. Em outras palavras, a proporção entre alelos dominantes e recessivos permanece constante de geração em geração, resultando em uma população em equilíbrio de Hardy-Weinberg, ou seja, uma população que não está evoluindo e que mantém suas frequências genéticas constantes.

Para que esse equilíbrio seja mantido, algumas condições devem ser atendidas:

- Ausência de mutações:** As mutações são uma fonte de novos genes e, portanto, alteram as frequências gênicas. Se um novo gene surge por mutação, sua frequência mudará imediatamente de zero para um valor diferente.
- Ausência de seleção natural:** Os genes alelos não devem estar sujeitos à seleção natural, o que significa que todos os indivíduos, independentemente dos alelos que possuem, devem ter as mesmas chances de sobreviver e se reproduzir. Se um alelo está associado a uma característica letal, sua frequência na população diminuirá rapidamente.
- Ausência de migrações:** Migrações podem trazer novos genes para a população ou levar genes para fora dela, alterando as frequências gênicas.
- Tamanho populacional grande:** A população deve ser suficientemente grande para que as proporções estatísticas sejam verificadas e para minimizar os efeitos da oscilação gênica, que pode alterar as frequências gênicas em populações pequenas.
- Reprodução sexuada panmítica:** A população deve se reproduzir de forma sexuada e os cruzamentos devem ocorrer ao acaso, sem preferências sexuais. Cruzamentos preferenciais, como aqueles entre parentes próximos (consanguíneos), podem aumentar a frequência de alelos recessivos que causam anomalias, elevando a mortalidade e, consequentemente, alterando as frequências alélicas.



Anote aqui



## Se liga, mamífero

No início do século passado, Hardy e Weimberg formularam um modelo matemático provando que as grandes populações em condições ideais, as proporções dos genes são constantes. Quando utiliza-se os termos “condições ideais” refere-se ao equilíbrio evolutivo que significa ausência de evolução. Segundo Hardy e Weimberg:  $p + q = 1$ , onde  $P$  = frequência do gene dominante e  $q$  = frequência do gene recessivo.

Considerando  $A = P$  e  $a = q$  podemos representar:  $AA = p^2$ ,  $AA = q^2$  e  $Aa = 2Pq$ .

Se a frequência genética for constante, a frequência genotípica também será.

Para que ocorra o equilíbrio de Hardy e Weimberg é necessário que haja as condições:

- A população deve ser bastante grande (milhares de indivíduos);
- A população precisa ser de reprodução sexuada e panmítica, ou seja, os cruzamentos devem ocorrer de maneira casual, não havendo preferência sexual.
- Não devem ocorrer mutações;
- Não pode haver seleção natural;
- Não pode ocorrer migração.

Na natureza não existe população que preencha as condições citadas. Não ocorrendo qualquer uma das condições citadas ocorre variação na frequência gênica. Essa mudança na frequência gênica caracteriza a evolução.

- Não devem ocorrer mutações;
- Não pode haver seleção natural;
- Não pode ocorrer migração.

Na natureza não existe população que preencha as condições citadas. Não ocorrendo qualquer uma das condições citadas ocorre variação na frequência gênica. Essa mudança na frequência gênica caracteriza a evolução.

Veja os exemplos a seguir.

► Exemplo 1:

Numa população, a frequência de indivíduos  $Rh^-$  é de 16%. Considerando que essa população esteja em equilíbrio, calcular

- a frequência do gene  $r$  (gene para  $Rh^-$ ).
- a frequência do gene  $R$  (gene para  $Rh_+$ ).
- a frequência de indivíduos com o genótipo  $RR$ .
- a frequência de indivíduos com o genótipo  $Rr$ .

- A)** Sabendo-se que os indivíduos  $Rh^-$  têm genótipo  $rr$ , tem-se

$$F_{(Rh^-)} = F_{(rr)} = q^2 = 0,16 \text{ (16%).}$$

Logo,

$$F_{(r)} = \sqrt{F_{(rr)}} = \sqrt{q^2} = \sqrt{0,16} = 0,4 \text{ (40%)}$$

Assim, a frequência nessa população do gene  $r = 0,4$ .

- B)** Como a  $F_{(r)} = 0,4$ , e lembrando que  $p + q = 1$ , então temos

$$p + q = 1$$

$$p + 0,4 = 1$$

$$p = 1 - 0,4$$

$$p = 0,6.$$

Assim, a frequência do gene  $R$  = frequência de  $p$ , ou seja,  $F_{(R)} = 0,6$  (60%).

- C)** A frequência do genótipo  $RR$  =  $p^2$ . Assim, temos

$$F_{(RR)} = p^2 = (0,6)^2 = 0,6 \cdot 0,6 = 0,36 \text{ (36%).}$$

- D)** A frequência de indivíduos com genótipo  $Rr$  =  $2pq$ . Assim, temos

$$F_{(Rr)} = 2 \cdot 0,6 \cdot 0,4 = 0,48 \text{ (48%)}$$

► Exemplo 2:

Numa população, verificou-se que a frequência de pessoas insensíveis ao PTC é de 9%. Sabendo-se que a sensibilidade ao sabor amargo dessa substância é condicionada por um gene autossômico dominante  $I$ , e a insensibilidade, pelo seu alelo recessivo, qual a frequência esperada nessa população de indivíduos sensíveis ao PTC, porém heterozigóticos?

## COMO CALCULAMOS AS FREQUÊNCIAS TOTAIS DE UMA POPULAÇÃO? (PARA CÁLCULOS COM DOIS GENES)

$$P^2 + 2 \times P \times q + q^2 = 1$$

$$AA + 2Aa + aa = 1$$

$$P + q = 1$$

$$A + a = 1$$

Para que ocorra o equilíbrio de Hardy e Weimberg é necessário que haja as condições:

- a população deve ser bastante grande (milhares de indivíduos);
- a população precisa ser de reprodução sexuada e panmítica, ou seja, os cruzamentos devem ocorrer de maneira casual, não havendo preferência sexual.

### Resolução:

Se os insensíveis ao PTC são homozigóticos recessivos ( $\text{ii}$ ), eles representam o termo  $q^2$  no Binômio de Newton. Assim,

$$F_{(\text{ii})} = q^2 = 9\% \ (0,09).$$

Se  $q^2 = 0,09$ , então  $q = \sqrt{0,09}$ , ou seja,  $q = 0,3$  (30%).

Como  $q$  = frequência do gene  $i$ , logo a  $F_{(\text{ii})} = 0,3$ .

Se a frequência do gene  $i = q = 0,3$ , então o valor de  $p$  = frequência do gene  $I$  será igual a  $1 - 0,3 = 0,7$  (70%). Lembre-se de que  $p + q = 1$  e, portanto,  $p = 1 - q$ .

Considerando que na expressão  $p^2 + 2pq + q^2 = 1$  os indivíduos heterozigóticos estão representados por  $2pq$ , uma vez que conhecemos os valores de  $p$  e  $q$ , temos

$$F_{(Ii)} = 2pq = 2 \cdot 0,7 \cdot 0,3 = 0,42 \ (42\%)$$

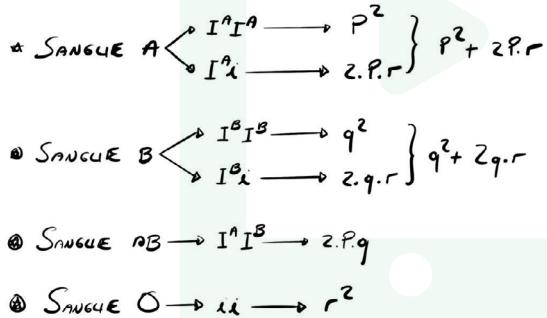
### Resposta:

A frequência esperada de indivíduos sensíveis heterozigóticos ( $Ii$ ) é de 42%.

## COMO CALCULAMOS AS FREQUÊNCIAS TOTAIS DE UMA POPULAÇÃO COM OS GENES EM POLIALELIA – EXEMPLO: SISTEMA ABO?

(para cálculos com três genes)

→ ABO



Em cálculos utilizando 3 alelos devemos pensar da seguinte forma:

$I^A \quad I^B \quad i$

$P \quad q \quad r$

Soma das frequências:

$$P^2 + 2 \times P \times r + q^2 + 2 \times q \times r + 2 \times P \times q + r^2 = 1$$

$$P + q + r = 1$$

## POPULAÇÕES PEQUENAS E ISOLADAS EVOLUEM MAIS FÁCILMENTE

Grupos pequenos e isolados tendem a evoluir mais rapidamente em comparação com populações grandes. Isso ocorre porque populações menores estão mais sujeitas à oscilação gênica, que é a variação aleatória nas frequências dos alelos ao longo do tempo. Além disso, populações pequenas têm uma maior probabilidade de cruzamentos consanguíneos, também chamados de endocruzamentos. Os endocruzamentos, que são cruzamentos entre indivíduos geneticamente aparentados, aumentam a probabilidade do surgimento de doenças genéticas, pois os alelos recessivos prejudiciais têm mais chances de se expressar. Isso pode resultar na eliminação de indivíduos portadores de tais alelos, reduzindo a variabilidade genética da população. O próprio isolamento geográfico contribui para essa diminuição da variabilidade, pois impede o intercâmbio genético com outras populações, o que manteria a diversidade genética.

Quando as populações isoladas são muito pequenas, esses efeitos são ainda mais pronunciados e podem levar a consequências perigosas, como a diminuição da resistência a doenças e a maior suscetibilidade a mudanças ambientais, o que pode predispor a população à extinção. Uma das preocupações com reservas florestais isoladas, por exemplo, é que elas abrigam uma diversidade genética limitada. Isso facilita a ocorrência de endocruzamentos, que podem enfraquecer geneticamente as populações, aumentando a incidência de anomalias genéticas. Para mitigar esses problemas, uma solução eficaz é a criação de corredores ecológicos, que são áreas de habitat natural conectando reservas isoladas. Esses corredores possibilitam o fluxo gênico entre diferentes populações, aumentando a variabilidade genética e reduzindo a frequência de cruzamentos consanguíneos. O fluxo gênico, ou seja, o movimento de genes entre populações, é fundamental para manter a saúde genética e a capacidade de adaptação das populações a longo prazo.



Anote aqui



## Bebê, se liga nessa

Não existem na natureza populações em equilíbrio de Hardy-Weinberg: Na natureza, é praticamente impossível encontrar populações que atendam a todas as condições descritas pelo equilíbrio de Hardy-Weinberg. Isso ocorre porque não é possível evitar completamente a ação de fatores evolutivos, como mutações, seleção natural, migrações e oscilações genéticas. A presença de qualquer um desses fatores pode provocar uma mudança na frequência dos genes de uma população, e essa mudança é o que chamamos de evolução. Quando a evolução está em ação, ela quebra o equilíbrio de Hardy-Weinberg, já que as frequências gênicas não permanecem constantes ao longo do tempo. Portanto, a Lei de Hardy-Weinberg descreve uma população ideal, ou seja, uma população que não evolui. No entanto, tal população ideal não existe na natureza, pois todos os organismos vivos estão sujeitos a pressões evolutivas. Embora o teorema de Hardy-Weinberg descreva uma situação teórica, ele é extremamente útil para os biólogos. Ao comparar uma população natural com o modelo idealizado do equilíbrio de Hardy-Weinberg, é possível identificar em que medida as frequências gênicas estão mudando e, consequentemente, como a evolução está agindo nessa população. A partir dessas observações, podem ser formuladas hipóteses sobre quais fatores evolutivos estão influenciando as mudanças genéticas.

### TEXTO COMPLEMENTAR:

#### MAIS EXEMPLOS DA FREQUÊNCIA GÊNICA E FREQUÊNCIA GENOTÍPICA

Vamos usar um exemplo prático para ilustrar esses conceitos.

- 640 indivíduos têm o genótipo AA
- 320 indivíduos têm o genótipo Aa
- 40 indivíduos têm o genótipo aa

A frequência genotípica nos permite calcular a proporção de cada genótipo na população. Isso pode ser feito dividindo o número de indivíduos com um determinado genótipo pelo total de indivíduos na população.

Assim, temos:

- Frequência de AA:  $f(AA) = 640/1000 = 0,64$  ou 64%.
- Frequência de Aa:  $f(Aa) = 320/1000 = 0,32$  ou 32%.
- Frequência de aa:  $f(aa) = 40/1000 = 0,04$  ou 4%.

Agora, calculamos a quantidade total de cada alelo (A e a) na população:

#### 1. Alelo A:

Total de genes A = 1.280 (640 indivíduos AA, com 2 genes A) + 320 (320 indivíduos Aa, com 1 gene A) = 1600

$$f(A) = 1.600 \text{ genes A} / 2000 = 80\% = 0,8$$

#### 2. Alelo a:

Total de genes a = 80 (40 indivíduos aa, com 2 genes a) + 320 (320 indivíduos Aa, com 1 gene a) = 400

$$f(a) = 400/2.000 = 20\% = 0,2$$

Repare agora que a frequência dos gametas nessa população é idêntica à frequência dos genes, pois em cada gameta existe apenas um gene. Então, as frequências de espermatozoides são: espermatozóide A = 0,8 e espermatozóides a = 0,2. As frequências de óvulos são: óvulos A = 0,8 e óvulos a = 0,2.

Vamos supor que a população usada no item anterior como exemplo vá reproduzir-se, nascendo assim uma geração F1. Admitamos ainda que o acasalamento ocorra de maneira totalmente casual, independentemente do fenótipo; em outras palavras, vamos supor que o fenótipo, quanto ao caráter que nos interessa, não interfira na escolha do parceiro sexual:

Estamos interessados, inicialmente, em saber em que proporção nascerão os indivíduos AA, Aa e aa.

#### a) Qual é a probabilidade de ocorrer um nascimento AA?

Essa probabilidade é igual à de se encontrarem um espermatozóide A e um óvulo A. Então:  $P(AA) = P(A \text{ e } A) = P(A) \times P(A) = 0,8 \times 0,8 = 0,64$ .

#### b) Qual é a probabilidade de ocorrer um nascimento Aa?

É igual à probabilidade de se encontrarem um espermatozoide A e um óvulo a ou um espermatozóide a e um óvulo A. Então:  $P(Aa) = P[(A \text{ e } a) \text{ ou } (a \text{ e } A)] = [P(A) \times P(a)] + [P(a) \times P(A)] = (0,8 \times 0,2) + (0,2 \times 0,8) = 0,32$ .

#### c) Qual é a probabilidade de ocorrer um nascimento aa?

É igual à probabilidade de se encontrarem um espermatozoide a e um óvulo a.  $P(aa) = P(a \text{ e } a) = 0,2 \times 0,2 = 0,04$ .

Repare então que na geração F1 os genótipos deverão ocorrer exatamente nas mesmas frequências que na geração parental: isso quer dizer que as frequências genotípicas não se modificaram; e, consequentemente, não mudaram também as frequências gênicas.



**Anote aqui**

# REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- AMABIS, Jose Mariano. Fundamentos da Biologia Moderna. 3 ed. São Paulo: Moderna, 2002.
- BURNIE, David. Dicionário Temático de Biologia. São Paulo: Scipione, 2001.
- CORSON, Walter H. ed. Manual Global de Ecologia: o que você pode fazer a respeito da crise do meio ambiente. São Paulo: Augustos, 1996.
- FAVARETTO, Jose Arnaldo. Biologia. 2 ed. São Paulo: Moderna, 2003.
- MORANDINI, Clezio & BELLINELLO, Luiz Carlos. São Paulo: Atual, 1999.
- PAULINO, Wilson Roberto. Biologia. São Paulo: Ática, 1998.
- SILVA Jr, Cesar da & SASSON, Sezar. Biologia. 3 ed. São Paulo: Saraiva, 2003.
- SOARES, Jose Luis. Biologia. São Paulo: Scipione, 1997.
- UZUNIAN, Armenio. Biologia. 2 ed. São Paulo: Harbra, 2004.
- ZAMPERETTI, Kleber Luiz. Biologia Geral. Rio Grande do Sul: Sagra-dc Luzzatto, 2003.
- FUTUYMA, Douglas J. Biologia Evolutiva. 2 ed. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1993.
- GOWDAK, Demetrio. Biologia. São Paulo: FTD, 1996.
- MORANDINI, Clezio & BELLINELLO, Luiz Carlos. São Paulo: Atual, 1999.
- PAULINO, Wilson Roberto. Biologia. São Paulo: Ática, 1998.
- SILVA Jr, Cesar da & SASSON, Sezar. Biologia. 3 ed. São Paulo: Saraiva, 2003.
- SOARES, Jose Luis. Biologia. São Paulo: Scipione, 1997.
- UZUNIAN, Armenio. Biologia. 2 ed. São Paulo: Harbra, 2004.
- ZAMPERETTI, Kleber Luiz. Biologia Geral. Rio Grande do Sul: Sagra-dc Luzzatto, 2003.
- FAVARETTO, J. A . e MERCADANTE, C.. Biologia, Vol. Único. São Paulo, Moderna, 2000.
- LINHARES, S. e GEWANDSZNAJDER. Biologia Hoje. Vols. 1, 2 e 3. Editora Ática, 1996.
- LOPES, S., Bio, Volumes 1, 2 e 3., Saraiva, 1997.
- SOARES, J. L.. Biologia no Terceiro Milênio, vols. 1, 2 e 3., São Paulo, 1998.
- EDITORAS
- CHEIDA, L.E. Biologia Integrada, Vol. 1, 2, 3 , São Paulo, Moderna, 2002.
- AMABIS e MARTHO, Fundamentos da Biologia Moderna, vol. Único, Moderna, São Paulo, 2003.
- PAULINO, W. R., Biologia, Vols. 1, 2, 3, Ática, São Paulo, 2002



*Estamos juntos nessa!*



TODOS OS DIREITOS RESERVADOS.