



BIOLOGIA

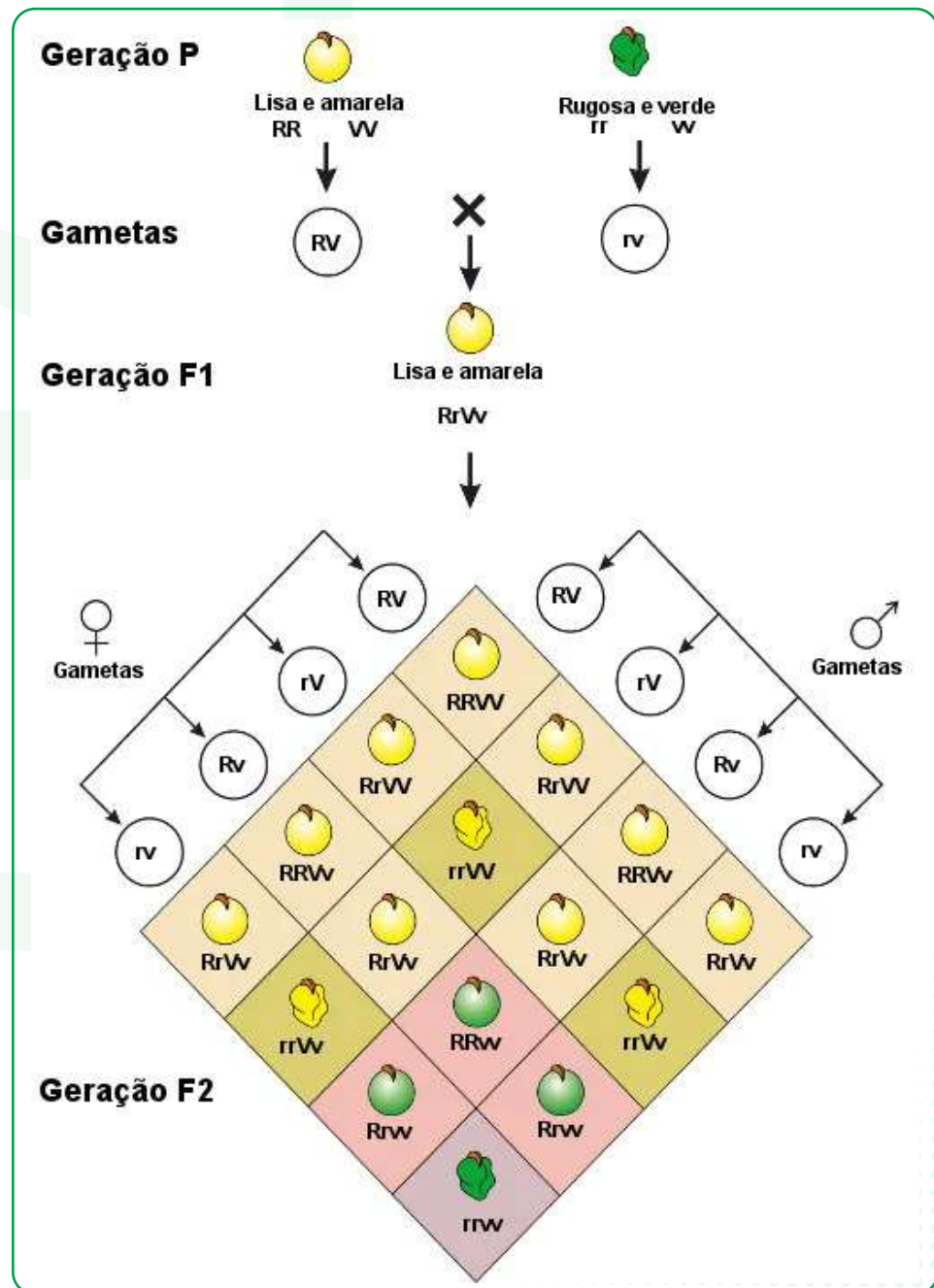
com **Arthur Jones**

Segunda Lei de Mendel

SEGUNDA LEI DE MENDEL

Nas primeiras experiências de Mendel, ele se concentrava em apenas uma característica de cada vez, ignorando as outras. Por exemplo, ele estudava apenas a cor ou a forma das sementes, sem combinar essas características. Mas depois de analisar esses sete caracteres de forma isolada, Mendel resolveu dar um passo adiante e observar o que aconteceria se ele acompanhasse a transmissão de dois caracteres ao mesmo tempo.

Em um dos seus experimentos, Mendel estudou a cor da semente (amarela ou verde) e a forma (lisa ou rugosa) simultaneamente. Ele cruzou plantas puras, ou seja, homozigotas, com sementes amarelas e lisas com outras de sementes verdes e rugosas. O resultado da primeira geração (F1) mostrou que todas as plantas tinham sementes amarelas e lisas, indicando que esses traços eram dominantes.



Fonte: brasilescola.com

Quando essas plantas da F1 foram autofecundadas, a geração seguinte (F2) revelou algo interessante: surgiram não só os fenótipos parentais (amarelas lisas e verdes rugosas), mas também novas combinações, como sementes amarelas rugosas e verdes lisas. Isso levou Mendel a perceber que a transmissão desses caracteres ocorreu de forma independente, ou seja, a cor da semente e a sua textura não estavam geneticamente vinculadas entre si. Essa descoberta foi fundamental para a formulação da Segunda Lei de Mendel, conhecida como a Lei da Segregação Independente.

Das 556 sementes que Mendel analisou, 315 eram amarelas e lisas, 101 amarelas e rugosas, 108 verdes e lisas, e 32 verdes e rugosas. Isso significa que todas as combinações possíveis de cor e forma apareceram no experimento.

Ele usou as letras V e v para representar os fatores que determinam as cores amarela e verde das sementes. Já R e r representavam a forma das sementes, podendo ser lisa ou rugosa. As plantas da geração parental eram puras, ou seja, tinham combinações de genes VVRR (amarelas e lisas) e vvrr (verdes e rugosas). Durante a formação dos gametas, cada gameta recebe apenas um gene para cada característica, formando assim os gametas VR e vr. Quando essas plantas foram cruzadas, as sementes da primeira geração (F1) eram todas amarelas e lisas, mas carregavam genes para ambas as características, sendo diíbridas (VvRr).

A sacada de Mendel foi perceber que os fatores para cor e forma se separam de maneira independente durante a formação dos gametas. Isso significava que as plantas diíbridas (VvRr) poderiam produzir quatro tipos diferentes de gametas em proporções iguais: VR, Vr, vR e vr. Ao cruzar esses gametas entre si, Mendel previu que, na geração seguinte (F2), surgiriam 16 combinações possíveis de genes, que poderiam ser organizadas em um quadro de Punnett. Essas combinações resultariam nos diferentes fenótipos observados: amarelas lisas, amarelas rugosas, verdes lisas e verdes rugosas, confirmando que os caracteres se segregam de forma independente, sem estarem ligados.

	RV	Rv	rV	rv
RV	RRVV	RRVv	RrVV	RrVv
Rv	RRVv	RRvv	RrVv	Rrvv
rV	RrVV	RrVv	rrVV	rrVv
rv	RrVv	Rrvv	rrVv	rrvv

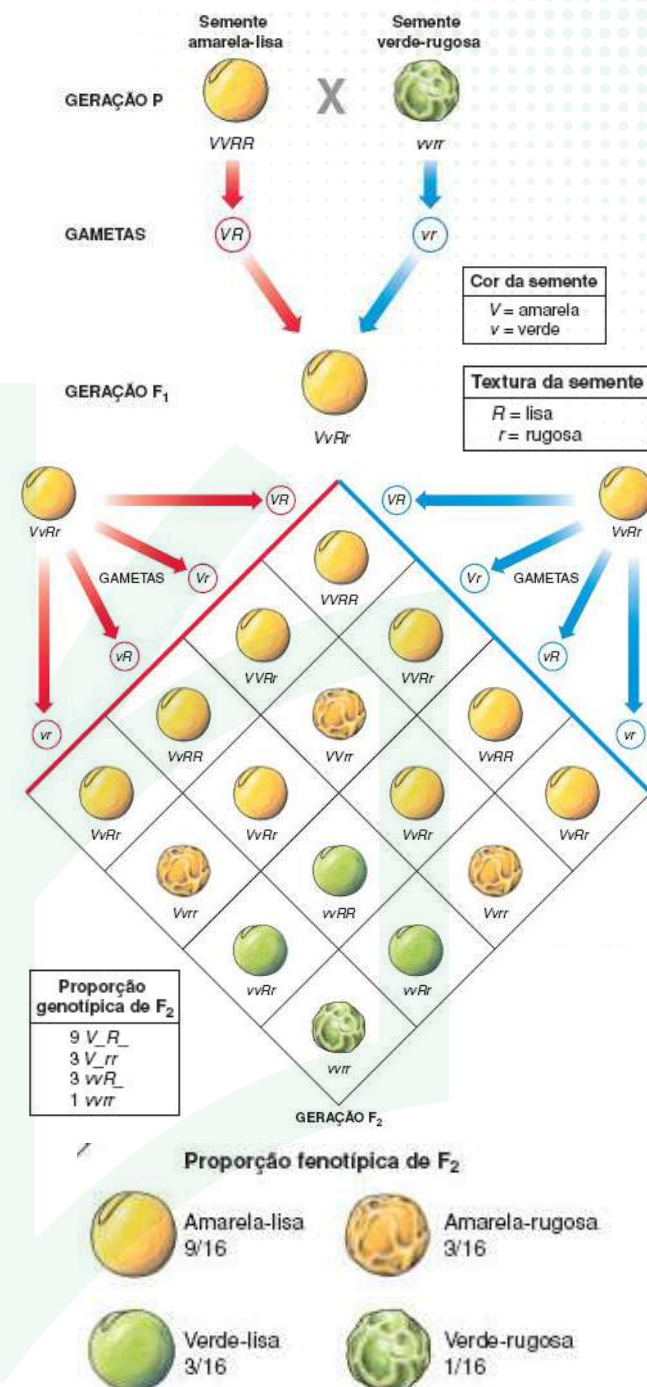
Fonte: InfoEnem

Se liga, mamífero

Mais de um caráter pode ser observado nos seres vivos. Uma característica clássica mendeliana é o fato da segregação da segunda lei ser do tipo INDEPENDENTE. Isso ocorre porque os gametas podem receber os genes independente de outras características.

Veremos mais na frente que nem sempre é assim, em casos de linkage, vamos observar que existe uma dependência entre os genes o que promove uma mudança nas proporções fenotípicas, mas, veremos isso mais na frente.

Observe a imagem abaixo:



ENUNCIADO DA 2ª LEI

As conclusões que Mendel tirou desses experimentos foram formuladas posteriormente como a Segunda Lei de Mendel. Essa lei pode ser resumida da seguinte maneira: os fatores que determinam dois ou mais caracteres diferentes são transmitidos aos gametas de forma completamente independente. Por isso, ela também é chamada de Lei da Segregação Independente.

No entanto, é importante saber que essa lei não se aplica a todas as situações. Em alguns casos, os genes podem estar ligados em um mesmo cromossomo e não se segregam de forma

independente. Por isso, a Segunda Lei de Mendel é menos geral que a Primeira Lei, que trata da segregação dos alelos de um único gene. A gente vai ver mais sobre essas exceções à medida que avançarmos no estudo da genética.



Se liga, mamífero

Quando você se depara com um problema de genética que envolve dois, três ou mais caracteres, uma das primeiras coisas que precisa entender é como os genes desses caracteres se segregam, ou seja, como eles são distribuídos nos gametas. Vamos dar uma olhada em um exemplo prático para esclarecer isso.

Vamos supor que você queira descobrir os tipos de gametas que um indivíduo com genótipo **AaBb** pode formar, e em que proporções.

Resolução: Aqui, estamos trabalhando com dois caracteres. Isso significa que o indivíduo tem dois pares de alelos: um par A/a e um par B/b. Na hora de formar os gametas, cada gameta precisa obrigatoriamente levar um gene de cada par. Isso está de acordo com a Primeira Lei de Mendel, que diz que os alelos de um gene se segregam durante a formação dos gametas. Agora, a sacada importante aqui é que esses pares de alelos se segregam de forma independente um do outro — isso é o que diz a Segunda Lei de Mendel, também conhecida como Lei da Segregação Independente. Como resultado, as combinações possíveis de alelos nos gametas são **AB, Ab, aB e ab**. Cada uma dessas combinações tem a mesma chance de ocorrer, ou seja, 25% para cada.

INTERAÇÃO GÊNICA (EPISTÁTICOS E NÃO EPISTÁTICOS)

Neste caso específico da hereditariedade, vários pares de genes não alelos podem influir em um mesmo caráter. Estas interações podem aparecer de três formas diferentes, as quais veremos a seguir:

EPISTASIA

Neste caso, um gene impede a manifestação de outro não alelo. O gene inibidor é chamado EPISTÁTICO, enquanto que o inibido é chamado HIPOSTÁTICO. A epistasia é um tipo interessante de interação gênica, onde um gene em um locus pode “inibir” ou “mascarar” o efeito dos genes em outro locus. É um fenômeno que se assemelha à dominância, mas com uma diferença importante: a dominância ocorre entre alelos do mesmo gene, enquanto a epistasia envolve genes diferentes que não são alelos.

Vamos usar um exemplo para deixar isso mais claro. Imagine que você tem o gene A, que é dominante sobre seu alelo a. Além disso, o gene A também exerce um efeito epistático sobre o par de genes Bb, ou seja, ele “inibe” a expressão desses genes. Nesse

caso, os genes “b” são considerados hipostáticos, porque são os que têm sua expressão “bloqueada” pelo gene A.

A epistasia pode se manifestar de diferentes formas: pode ser dominante, recessiva ou duplo-recessiva. Essas variações dependem de como os genes interagem entre si e de como esses efeitos se expressam no fenótipo do organismo. Vamos explorar um exemplo de cada tipo para entender melhor essas interações.

Tipos De Epistasia

Epistasia dominante

Na epistasia dominante, o gene que tem o efeito epistático só vai “inibir” a ação dos outros genes se ele estiver presente em sua forma dominante. Um exemplo clássico disso é a cor das cebolas.

A cor das cebolas é determinada por dois pares de alelos. O alelo A dá a cor roxa, enquanto o alelo a resulta na cor amarela. No entanto, existe outro gene, o alelo epistático I, que pode “inibir” a expressão dessas cores, resultando em cebolas brancas. Se o alelo I está presente, ele impede que a cor se manifeste, independentemente dos alelos A ou a que estejam presentes. Por outro lado, se o alelo recessivo i estiver presente em homozigose (ii), ele permite que a cor natural se manifeste — seja ela roxa ou amarela.

Aqui está como os genótipos se relacionam com as cores das cebolas:

- Genótipo iiA_: cebola roxa (o alelo A é dominante e a ausência do alelo I permite a expressão da cor).
- Genótipo iiaa: cebola amarela (sem o alelo I para inibir e com o alelo a em homozigose).
- Genótipo I__: cebola branca (a presença do alelo I inibe a expressão de qualquer cor, seja roxa ou amarela).

Observe que:

Geração P: IiAa (branca) x IiAa (branca)

↓

Geração F1: 9 I_A_ (branca):3 A_bb (brancas):3 iiA_ (roxas):1 iiaa (amarelas) ou 12 brancas:3 roxas:1 amarela.

O resultado obtido do cruzamento de dois diíbridos, 12:3:1, é uma modificação da proporção clássica 9:3:3:1.

► Exemplo: Cor da plumagem de galinhas;

Na plumagem das galinhas, dois genes diferentes controlam a cor: o gene C e o gene I. O gene C determina a cor real da plumagem — quando ele está na forma dominante (C), a plumagem pode ser colorida, enquanto a forma recessiva (cc) resulta em plumagem branca, mas por outro mecanismo. No entanto, há um segundo gene, o gene I, que é epistático e atua como um “inibidor” da cor.

Como funciona:

- Se o gene I estiver presente na sua forma dominante (I_), ele “inibe” a ação do gene C, fazendo com que a plumagem seja branca, independentemente da presença do alelo C.

- Se o gene I estiver na forma recessiva (ii), o gene C pode se expressar livremente. Assim, se o gene C estiver na forma dominante (C₋), a galinha terá plumagem colorida. Se estiver na forma recessiva (cc), a plumagem será branca, mas não pela ação do gene I, e sim porque o gene C na forma cc não permite a produção de cor.



Genótipo das Galinhas	C ₋ ii (CCii ou Ccii)	C ₋ I ₋ ou ccl ₋ ou ccii (CCII ou CcII ou CcII ou ccll ou ccll)
Fenótipo das Galinhas	Galinhas Coloridas	Galinhas Brancas

Fonte: Escolaeducacao

Genótipos e Fenótipos:

- I₋C₋: Galinha com plumagem branca (o gene I dominante inibe a cor).
- I₋cc: Galinha com plumagem branca (novamente, o gene I inibe a cor).
- iiC₋: Galinha com plumagem colorida (sem o gene I para inibir, o gene C se expressa).
- iicc: Galinha com plumagem branca (sem cor por falta da função do gene C, não por inibição).

Epistasia recessiva

Na epistasia recessiva, o gene epistático só “inibe” a expressão dos outros genes quando está presente em sua forma recessiva, ou seja, em homozigose. Um exemplo clássico disso é a coloração do pelo em ratos, que depende de dois pares de genes: Cc e Aa.

O alelo C é responsável pela produção de pigmento preto. Se um rato tem pelo menos um alelo C, ele consegue produzir pigmento. Porém, se ele tiver dois alelos recessivos cc, isso leva à ausência total de pigmento, resultando em albinismo. Já o alelo A produz pigmento amarelo, e o alelo recessivo a não produz esse pigmento.

Quando um rato tem os alelos C e A, ele produz tanto pigmento preto quanto amarelo, o que resulta numa coloração pardo-acizentada conhecida como “aguti”. Se o rato for cc, ele será albino, independentemente dos alelos A ou a, porque o par cc é epistático sobre o locus A, bloqueando qualquer produção de pigmento.

Aqui estão os genótipos e as cores correspondentes:



Fonte: sobiologia.com

- Genótipo C₋A₋:** rato aguti (tem pigmento preto e amarelo).
- Genótipo C₋aa:** rato preto (produz apenas pigmento preto).
- Genótipo cc₋:** rato albino (não produz pigmento, independentemente do que os outros genes determinariam).

Quando cruzamos dois ratos aguti diíbridos (CcAa x CcAa), os descendentes podem apresentar uma variedade de genótipos e fenótipos, devido à segregação independente dos alelos e à epistasia recessiva que bloqueia a coloração. Esse cruzamento pode resultar em ratos aguti, pretos ou albinos, dependendo da combinação dos alelos herdados.

O cruzamento de dois ratos aguti diíbridos dá o seguinte resultado:

Geração P: CcAa (aguti) x CcAa (aguti)

↓

Geração F1: 9 C₋A₋ (aguti):3 C₋aa (pretos):3 ccA₋ (albinos):1 ccaa (albinos) ou 9 aguti:3 pretos:4 albinos

Além de ratos, características como o **albinismo** e o **fenótipo Bombaim** em humanos também são exemplos de epistasia recessiva. No caso do albinismo, o alelo recessivo para a ausência de pigmento pode “mascarar” a expressão de outros genes que poderiam influenciar a cor da pele ou dos olhos. O fenótipo Bombaim, que se refere a um tipo raro de tipo sanguíneo em humanos, também é condicionado por epistasia recessiva, onde o gene epistático afeta a expressão dos antígenos sanguíneos.

Epistasia dupla recessiva

Na epistasia duplo-recessiva, também conhecida como interação gênica complementar, qualquer um dos dois pares de genes pode inibir a expressão do outro quando está em sua forma recessiva. Ou seja, a presença de dois alelos recessivos em qualquer um dos pares de genes é suficiente para resultar na ausência da característica esperada.

Vamos usar a coloração das flores da ervilha-de-cheiro (Lathyrus) como exemplo para entender isso melhor. A cor da flor pode ser púrpura ou branca, e para que a flor seja colorida (púrpura), são necessários alelos dominantes em ambos os pares de genes: P e C. Se faltar um alelo dominante em qualquer um desses pares, a flor será branca.

Você pode ver isso da seguinte forma:



Fonte: Blogdoarcoverde

- Genótipo P₋C₋:** A flor é púrpura. Para que a flor tenha cor, deve haver pelo menos um alelo dominante P e um alelo dominante C.

- **Genótipo P_{cc}**: A flor é branca. Embora tenha um alelo P dominante, o par de alelos cc não permite a produção de pigmento, resultando em uma flor branca.
- **Genótipo ppC₋**: A flor é branca. Mesmo com um alelo C dominante, o par de alelos pp não permite a produção de pigmento, resultando em uma flor branca.
- **Genótipo ppcc**: A flor é branca. Neste caso, ambos os pares de alelos são recessivos, impedindo totalmente a produção de pigmento e resultando em uma flor branca.

Esse exemplo ilustra como a presença de alelos recessivos em qualquer um dos pares de genes pode “inibir” a expressão da cor, demonstrando a interação gênica complementar.

Casos de interação gênica não epistática

Quando falamos de interação gênica não epistática, estamos nos referindo a situações onde dois ou mais genes interagem entre si para determinar um fenótipo, mas nenhum alelo impede a expressão do outro. Em vez disso, cada gene contribui de forma aditiva ou complementar para o fenótipo final. Um exemplo claro disso é a forma das cristas de galinha.





Existem quatro tipos diferentes de crista em galinhas: rosa, ervilha, noz e simples. Vamos explorar como esses tipos são determinados por dois genes, E e R:

1. Gene E (Crista Ervilha): O alelo dominante E resulta em crista ervilha.

2. Gene R (Crista Rosa): O alelo dominante R resulta em crista rosa.

Quando ambos os alelos dominantes estão presentes (E e R), ocorre uma interação gênica que resulta em uma crista do tipo noz. Por outro lado, se nenhum dos alelos dominantes está presente, a crista será do tipo simples.

Aqui está a correspondência entre genótipos e fenótipos para as cristas de galinha:

Genótipos	Cristas
RREE RrEE RREe RrEe	Noz 
RRee Rree	Rosa 
rrEE rrEe	Ervilha 
Reee	Simples 

Fonte: InfoEnem

- **Genótipo R_{ee}**: Crista rosa (o alelo dominante R está presente, mas o alelo recessivo ee não influencia).
- **Genótipo rrE₋**: Crista ervilha (o alelo dominante E está presente, mas o alelo recessivo rr não influencia).
- **Genótipo R₋E₋**: Crista noz (ambos os alelos dominantes estão presentes, resultando na crista noz devido à interação gênica entre E e R).
- **Genótipo rree**: Crista simples (nenhum dos alelos dominantes está presente, resultando na crista simples).

Pleiotropia

Constitui o fenômeno em que um mesmo genótipo é responsável por mais de uma manifestação fenotípica. Nesse caso, os genes envolvidos são ditos pleiotrópicos (do grego pleios, mais). Veja o exemplo a seguir. Em camundongos (*Mus musculus*), o mesmo par de genes alelos que determina a coloração cinza ou branca da pelagem também é responsável pela maior ou menor agressividade do animal. Veja que são duas características: cor da pelagem e grau de agressividade do animal. Assim, nos camundongos, pode-se ter:

- **Gene B**, que condiciona a formação de pelagem cinza e comportamento muito agressivo.
- **Gene b**, que condiciona a formação de pelagem branca e comportamento pouco agressivo.

Os genótipos e respectivos fenótipos que podem existir resultantes da combinação entre esses dois genes são:

Genótipos	Fenótipos
BB	Cinza e muito agressivo
Bb	Cinza e muito agressivo
bb	Branco e pouco agressivo (dócil)

Assim, todo camundongo branco (**bb**) é mais manso (menos agressivo), enquanto todo camundongo cinzento (**BB** ou **Bb**) é muito agressivo.

Exemplos de pleiotropia

Um bom exemplo de pleiotropia na espécie humana é o do gene responsável pela anemia falciforme. Tal anomalia é resultante da substituição de um único aminoácido num determinado trecho da molécula de hemoglobina, o que acarreta a formação de uma hemoglobina anômala (hemoglobina s). Essa hemoglobina anômala, por sua vez, faz com que as hemácias (glóbulos vermelhos) tenham uma forma também anômala, que lembra a lâmina de uma foice (daí o termo *falciforme*). Essas hemácias falciformes, por sua vez, são destruídas mais rapidamente que as hemácias normais, causando, consequentemente, a anemia. Em consequência dessa anemia, haverá o comprometimento de praticamente todo o metabolismo normal do indivíduo, que apresentará, por exemplo, fraqueza, diminuição das funções mentais, insuficiência cardíaca, desenvolvimento físico retardado, etc. Por outro lado, o indivíduo que tem anemia falciforme é mais resistente à malária provocada pelo *Plasmodium falciparum*. Assim, há várias manifestações fenotípicas determinadas por um mesmo genótipo.



Estamos juntos nessa!



CURSO
FERNANDA PESSOA
ONLINE

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS.