



MEIOSE E AS LEIS DE MENDEL

Lyria Mori¹, Maria Augusta Querubim Rodrigues Pereira² e Carlos Ribeiro Vilela³

Departamento de Genética e Biologia Evolutiva, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo.

1 - lmori@ib.usp.br,

2 - guquerubim@gmail.com,

3 - crvilela@ib.usp.br

RESUMO

Esta atividade consiste em uma simulação da meiose, com ênfase nos seus aspectos mais relevantes relacionados à hereditariedade. Ela pode ser usada como uma introdução ou como um exercício para destacar o paralelismo existente entre o comportamento dos cromossomos na gametogênese e o dos genes na transmissão das características hereditárias; em suma, para compreender as relações entre a meiose e as leis de Mendel.

O público-alvo é formado pelos alunos do ensino médio e de cursos de graduação em Ciências Biológicas e áreas correlatas.

OBJETIVO

Destacar os eventos da meiose mais significantes relacionados à transmissão das características hereditárias, tais como: a) emparelhamento e segregação (separação) dos cromossomos de origem materna e paterna que formam cada par de cromossomos homólogos; b) segregação independente dos cromossomos não homólogos; c) paralelismo entre o comportamento dos cromossomos na meiose e a segregação dos alelos de um mesmo gene e daqueles de genes localizados em cromossomos não homólogos.

JUSTIFICATIVA

A principal justificativa desta atividade baseia-se no fato de que somente cerca de 10% dos estudantes conseguem entender que a segregação dos alelos de um mesmo gene (1ª lei de Mendel) e a segregação independente dos alelos que determinam características distintas (2ª lei de Mendel) ocorrem como consequência dos genes estarem localizados nos cromossomos e do comportamento destes,

durante a formação dos gametas (meiose). O desenvolvimento da Genética também tem permitido saber como certas doenças são transmitidas ao longo das gerações. Conhecendo-se o modo de transmissão de uma patologia hereditária é possível, por exemplo, estimar as chances de um casal vir a ter filhos afetados. Com isso, pode-se realizar o aconselhamento genético, ou seja, orientar casais, alertando-os para uma gravidez de alto risco, que poderia ser evitada. O conhecimento dos princípios da Genética e seus eventuais benefícios e riscos são de fundamental importância para uma participação ativa e consciente da sociedade, como por exemplo, nas discussões sobre o uso de alimentos geneticamente modificados (transgênicos), na utilização de terapia gênica etc.

PREPARANDO A ATIVIDADE

Para que esta atividade seja bem aproveitada é interessante que ela seja feita após os alunos terem dominado os conceitos de célula, do mecanismo de multiplicação celular (mitose) e das leis de Mendel. É muito importante que seja dada ênfase ao paralelismo entre a segregação dos fatores mendelianos e o comportamento dos cromossomos na meiose; estas associações estão detalhadas no ANEXO. A meiose (divisão celular que resulta na formação dos gametas) poderá ser apresentada pela primeira vez durante a atividade, ou ser apenas recapitulada. Neste caso, recomenda-se omitir as cinco subdivisões da prófase I, que geralmente mais dificultam do que facilitam a compreensão do processo contínuo da divisão celular.

O número de participantes ideal é de até 40 alunos divididos em grupos de quatro a cinco. O tempo necessário para a atividade é de cerca de 40 minutos.

Materiais Para Cada Grupo (Figura 1)

- Uma espátula.
- Dois percevejos coloridos, marcados com a letra **A** e dois, com a letra **a**.
- Dois percevejos coloridos, marcados com a letra **B** e dois, com a letra **b**.
- Oito alfinetes de mapas, sendo quatro vermelhos e quatro azuis.
- Quatro bastões de massa de modelar, de diferentes cores.
- Uma folha grande de papel (cartolina ou *Kraft*).



Figura 1: Foto dos materiais: à esquerda, espátula, no meio, retângulo de EVA (Etil Vinil Acetato) com oito percevejos (alelos) e oito alfinetes de mapa (centrômeros); à direita, quatro bastões de massa de modelar (cromossomos).

ATIVIDADE

A atividade consiste de simulações do processo de meiose, executadas em duas situações:

- I) meiose em células com apenas um par de cromossomos ($2n = 2$) e com genótipo **Aa**;
- II) meiose em células com dois pares de cromossomos ($2n = 4$) e com genótipo **AaBb**, sendo cada par de alelos localizado em cromossomos não homólogos.

Simulação da meiose com modelos em massa de modelar

I. Célula com um par de cromossomos e heterozigótica (Aa) para um gene

1. Desenhar um círculo na folha grande de papel, representando a membrana da célula que se dividirá

por meiose. Lembre-se de que a membrana do núcleo se desfaz quando a célula entra em divisão.

2. Inserir os percevejos marcados com as letras **A** e **a**, representando os alelos do gene em questão, em uma mesma posição de um par de bastões de massa de modelar. Em seguida, colocar os alfinetes de mapa nas regiões correspondentes aos centrômeros.
3. Duplicar cada cromossomo, materno e paterno, cortando longitudinalmente cada bastão com a espátula, e inserir o alelo correspondente nos novos bastões (cromátides) obtidos.
4. Reunir as metades de cada bastão na região dos centrômeros.
5. Com os bastões de massa cortados longitudinalmente e representando os cromossomos duplicados, simular:
 - a) o emparelhamento dos cromossomos homólogos
 - b) a primeira divisão da meiose
 - c) a segunda divisão da meiose

Atenção. Para esta simulação, e também para a próxima (II.a, b e c), deve ser enfatizado que o material genético (DNA) duplica-se antes do processo de meiose propriamente dito, isto é, durante a intérfase precedente, e que o emparelhamento ocorre bem no início da prófase. Portanto, diferentemente da simulação proposta, a duplicação e o emparelhamento ocorrem antes da visualização dos cromossomos ao microscópio fotônico, ou seja, quando eles se encontram ainda em forma de fios muito finos denominados cromatina (que é um complexo formado por DNA e proteínas).

II. Célula com dois pares de cromossomos, heterozigótica (AaBb) para dois genes localizados em cromossomos não homólogos

a) Representação dos cromossomos antes da duplicação do material genético

1. Utilizar quatro bastões de massa de modelar para representar dois pares de cromossomos homólogos. Usar cores diferentes para os cromossomos de origem paterna e materna e para os diferentes pares de cromossomos homólogos. Reaproveitar os dois bastões utilizados na simulação anterior.
2. Afixar um alfinete em cada um dos bastões de tal forma que eles representem um par de cromossomos metacêntricos (centrômero na região mediana do bastão) e um par de cromossomos acrocêntricos (centrômero próximo a uma das extremidades).
3. Aplicar os percevejos marcados com as letras **A** e **a** nos bastões de massa que representam os cromos-

somos metacêntricos. Nos bastões de massa que representam os cromossomos acrocêntricos, aplicar os percevejos com as letras **B** e **b**.

b) Representação dos cromossomos após a duplicação do material genético

1. Simular a duplicação dos cromossomos, dividindo longitudinalmente cada bastão com o auxílio da espátula.
2. Reunir as metades de cada bastão na região dos centrômeros.
3. Colocar o alelo correspondente nas novas cromátides formadas.

c) Simulação do emparelhamento dos cromossomos homólogos e das divisões I e II da meiose

1. Com os bastões de massa representando os cromossomos duplicados simular:
 - a) o emparelhamento dos cromossomos homólogos, **sem permutação** entre eles;
 - b) a primeira divisão (I) da meiose;
 - c) a segunda divisão (II) da meiose.

ENTENDENDO A ATIVIDADE

- 1) Na seção **I.2**, o que representa cada um bastões de massa de modelar, antes e depois de dividi-los longitudinalmente? Quantas moléculas de DNA formam cada cromossomo antes e depois da divisão? Explique.
- 2) Na sua simulação identifique: (a) os cromossomos homólogos, (b) as cromátides-irmãs, (c) os cromossomos não homólogos.
- 3) Se o alelo presente em uma determinada cromátide é **A**, na cromátide-irmã também está presente o alelo **A**. Explique o porquê.
- 4) Quantas possibilidades de posicionamento são possíveis quando dois pares de cromossomos homólogos emparelhados estão na metáfase da primeira divisão da meiose?
- 5) Compare o comportamento dos cromossomos na meiose com a segregação dos alelos: (a) na primeira divisão meiótica, (b) na segunda divisão meiótica.
- 6) Quantos e quais tipos de gametas foram formados na meiose de **apenas uma célula** duplo-heterozigótica (**AaBb**)?
- 7) De acordo com a lei da segregação independente (2ª lei de Mendel), quantos e quais tipos de gametas são produzidos por um indivíduo duplo-heterozigótico **AaBb**?
- 8) É adequado afirmar que a 1ª lei de Mendel é resultado direto da separação de um par de cromossomos homólogos e de sua migração para células opostas na 1ª divisão meiótica? Justifique.
- 9) É adequado afirmar que a 2ª lei de Mendel resulta do comportamento independente de um determinado par de cromossomos homólogos em relação a outro par de homólogos durante a 1ª divisão da meiose? Justifique.

PROBLEMAS

- 1) O que herdamos biologicamente de nossos pais?
- 2) Explique como o número de cromossomos é mantido constante, ao longo das gerações, nas espécies com reprodução sexuada.
- 3) A síndrome de Down é o tipo mais comum e viável das anomalias cromossômicas humanas e ocorre em cerca de 0,12% das crianças nascidas vivas, crianças estas cujos pais são geralmente normais com relação ao número de cromossomos e sem qualquer histórico da síndrome na família. A causa mais frequente da síndrome de Down é a trissomia (três cromossomos) do cromossomo 21. Proponha uma hipótese para explicar a possível origem desta trissomia.
- 4) A autofecundação é um tipo de reprodução sexuada? Justifique a sua resposta.
- 5) Por que a descendência originada de reprodução sexuada é tão variada? Quais são os fatores responsáveis por esta variabilidade?
- 6) Imagine uma determinada espécie que tenha um número diploide de cromossomos igual a 10. Cada célula que se divide por meiose se transforma em quatro gametas. Se os cinco pares de cromossomos dessa célula forem numerados de 1 a 5, poderemos formar, por exemplo, dois gametas que receberam do par número 1 apenas o cromossomo de origem paterna e dos demais pares, apenas os cromossomos de origem materna, e outros dois gametas que ficam com o cromossomo número 1 de origem materna e os demais cromossomos de origem paterna. Assim, existem muitas possibilidades de associar, por acaso, nos gametas, um dos cromossomos de cada um dos cinco pares de cromossomos da espécie, lembrando-se que, para cada par, um dos cromossomos tem origem paterna e o outro, origem materna. Quantas seqüências cromossômicas (se de origem paterna ou materna, em cada par) são possíveis, para esta espécie com número diploide igual a 10, durante o processo de meiose para a formação dos gametas?
- 7) É adequado afirmar que a 1ª e 2ª leis de Mendel resultam do comportamento dos cromossomos durante a meiose? Justifique a sua resposta.

ANEXO

I. Informações para o Professor

I.1 - Meiose

A meiose é um tipo de divisão celular no qual uma célula diploide dá origem a quatro células haploides (gametas). Na intérfase que antecede a meiose todo material hereditário é duplicado; por esta razão, cada cromossomo, quando visualizado, já possui duas cromátides (as cromátides-irmãs). No início da primeira divisão da meiose, os cromossomos homólogos posicionam-se lado a lado ao longo de todo o seu comprimento, ou seja, emparelham-se e posicionam-se na placa equatorial da célula. Em seguida, os homólogos separam-se e migram para polos opostos, originando duas células, cada uma delas contendo apenas um cromossomo, porém já duplicado, de cada par de homólogos. Na segunda divisão da meiose, as cromátides-irmãs, unidas na região dos centrômeros, posicionam-se na placa equatorial da célula e, em seguida, separam-se, migrando cada uma delas para polos opostos, sendo então incluídas em células-filhas diferentes, de modo que, ao final da meiose, há a formação de quatro células haploides ou gametas. **A atividade II.1.** pode ser também usada para se fazer uma simulação da mitose e para comparação dos dois tipos de divisão.

I.2 – Cromossomos e genes

Dentro de um determinado núcleo interfásico visualiza-se, em microscopia fotônica e com corantes especiais, um material denominado cromatina que é formado por DNA e proteínas (histonas e não histonas) e que apresenta uma aparência filamentososa e frouxa. No início do século passado, os pesquisadores concluíram que os filamentos de cromatina das células em intérfase são, embora não pareçam, entidades individualizadas. Durante a intérfase que antecede uma divisão celular, cada um desses filamentos (uma molécula de DNA) é duplicado e, em seguida, empacotado com o auxílio de proteínas (histonas), em estruturas compactas denominadas cromossomos, que se tornam visíveis e individualizadas em microscopia fotônica. Assim, cada cromossomo é formado por uma molécula de DNA associada a proteínas. A molécula de DNA é uma dupla-hélice formada por duas fitas antiparalelas, torcidas uma sobre a outra e mantidas juntas por pontes de hidrogênio que ligam as bases nitrogenadas complementares. Atualmente, está muito bem estabelecido que o DNA é o material hereditário da maioria dos seres vivos e que contém, em sua sequência, informações que permitem a síntese de RNA e proteínas. Cada segmento necessário para a produção de uma proteína ou de um RNA é denominado gene. Cada cromossomo é constituído por apenas **uma molécula** (dupla-hélice) de DNA. Quando a

célula vai entrar em processo de multiplicação (mitose) ou de formação de gametas (meiose) todo material hereditário (DNA) também é previamente duplicado. Esse processo ocorre durante a intérfase, quando os cromossomos ainda não são visíveis. Como resultado dessa duplicação o número de moléculas de DNA da célula será duplicado. A atividade II.1 pode ser usada para simular a molécula de DNA dentro de cada cromossomo e sua respectiva duplicação, com o auxílio de dois fios elétricos, torcidos um sobre o outro, representado a dupla hélice. Os organismos diploides apresentam dois conjuntos de cromossomos, um destes conjuntos foi recebido do pai, através do gameta masculino (espermatozóide) e o outro foi recebido da mãe, pelo óvulo. Os cromossomos que compõem um determinado par são equivalentes e contêm os mesmos genes que estão localizados nas mesmas posições. Devido a essas semelhanças, eles são denominados cromossomos homólogos e têm a capacidade de se emparelhar. Assim, cada indivíduo apresenta duas cópias de cada gene, sendo que as versões de origem materna e paterna podem ser idênticas ou diferentes. As diferentes versões de cada gene são denominadas alelos, e são caracterizadas por pequenas alterações na sequência de nucleotídeos do segmento de DNA que corresponde ao gene.

I.3 – Leis de Mendel

A segregação (separação) dos alelos de um gene (1ª lei de Mendel) e a segregação independente dos alelos que determinam características distintas (2ª lei de Mendel) ocorrem como consequência da localização dos genes nos cromossomos, e do comportamento destes, durante a formação dos gametas (meiose). Exemplificando, vamos considerar a meiose de um indivíduo heterozigótico, **Aa**, cuja mãe era homozigótica para o alelo **A** (portanto **AA**), e o pai homozigótico para o alelo **a** (portanto **aa**) de um determinado gene. Na separação dos cromossomos homólogos, ao final da primeira divisão da meiose (anáfase) os cromossomos de origem paterna e materna se separam e migram para polos opostos da célula, um deles carregando um alelo **A** em cada cromátide-irmã e o outro carregando um alelo **a** em cada cromátide-irmã. Esta separação física dos dois cromossomos separa também os alelos de origem materna e de origem paterna, que ficam contidos em células diferentes. A primeira lei de Mendel ou princípio da segregação afirma que os gametas são “puros”, ou seja, carregam somente um dos fatores responsável por uma determinada característica. Note que a primeira Lei de Mendel é, portanto, consequência da separação física dos cromossomos homólogos. A relação entre a primeira divisão da meiose e a primeira lei de Mendel pode ser explorada com a **atividade II.1.** (Figura 2)

| | Cromossomos | Fatores Mendelianos |
|--------------------------------|-------------|--|
| Emparelhamento | | A A a a |
| Segregação | | A A ↑ ↓ a a |
| Segregação Independente | | A B A b A B A b ↑ ↑ ↓ ↓ ou ou ↓ ↓ ↓ ↓ a b a B a b a B |

Figura 2: Paralelismo entre o comportamento dos cromossomos, durante a primeira divisão da meiose, e a segregação dos fatores mendelianos. Na parte superior da figura, à esquerda, está representado um par de cromossomos já duplicados e emparelhados, sendo que o cromossomo de cor azul escuro representa, por exemplo, o cromossomo de origem paterna e o de cor azul clara, o cromossomo de origem materna; logo abaixo, está representada a separação dos cromossomos homólogos e, à direita, estão representados os alelos AA e aa. Na parte inferior da figura estão representados, à esquerda, dois pares de cromossomos, ao seu lado, o posicionamento alternativo e, à direita, a respectiva separação ao acaso dos dois pares de alelos (fatores representados por letras) (modificada de Griffiths et al. 2000).

O princípio da segregação independente ou 2ª lei de Mendel também é uma consequência da separação, durante a anáfase da primeira divisão da meiose, dos cromossomos de origem paterna e materna que estavam previamente duplicados e emparelhados na metáfase. Para entender a relação, temos que considerar dois genes localizados em dois pares de cromossomos, e a formação de gametas (meiose) de um heterozigoto **AaBb**, produzido pelo cruzamento, por exemplo, de um indivíduo **AABB** com um indivíduo **aabb**.

Durante o emparelhamento dos cromossomos homólogos, o cromossomo (já duplicado; parte inferior da Figura 2) contendo os alelos **AA** (azul-escuro) emparelha-se com o seu homólogo portador dos alelos **aa** (azul-claro), e o mesmo acontece com os cromossomos portadores dos alelos **BB** (amarelos) e **bb** (vermelhos). Note que o posicionamento dos cromossomos portadores dos alelos **AA** e **aa** é totalmente ao acaso em relação aos cromossomos portadores dos alelos **BB** e **bb**. Assim, uma célula cujo cromossomo materno (portador dos alelos **AA**) está voltado para o polo superior e o cromossomo

homólogo (paterno) portador dos alelos **aa** está voltado para o polo inferior poderá ter, por exemplo, o cromossomo portador dos alelos **BB** voltado para o polo superior e o portador dos alelos **bb**, para o polo inferior. Assim sendo, ao final da meiose desta célula teremos a formação de apenas dois tipos de (gametas), sendo dois **Ab** e dois **aB**.

Em outra célula, durante a meiose, este posicionamento poderá ser: cromossomo portador dos alelos **AA** voltado para o polo superior, o seu homólogo portador dos alelos **aa** para o polo inferior, o cromossomo portador dos alelos **bb** voltado para o polo superior e o seu homólogo portador dos alelos **BB**, para o polo inferior, formando ao final da meiose outros dois tipos de gametas: dois gametas **AB** e dois gametas **ab**. As chances de ocorrer um tipo de posicionamento, ou o outro, é de 50%, portanto no conjunto de células que entram em meiose em um indivíduo **AaBb** haverá formação de gametas **AB**, **Ab**, **aB** e **ab** na proporção de 1:1:1:1.

A probabilidade equivalente dos quatro tipos de gametas é resultado do posicionamento independente e aleatório dos dois pares de cromossomos durante a pri-

meira divisão da meiose. Portanto, a segunda lei de Mendel ou “princípio da segregação independente” dos genes localizados em cromossomos não homólogos é uma consequência da localização dos genes em diferentes pares de cromossomos (Figuras 3 e 4). Podemos inclusive fa-

zer uma previsão sobre os resultados esperados em caso de genes localizados no mesmo cromossomo (pode-se usar a mesma atividade para testar esta previsão, colocando os dois genes no mesmo cromossomo, para mostrar a ausência de segregação independente).



Figura 3: Na casela da esquerda, estão representados dois pares de cromossomos homólogos logo após o emparelhamento, quando se inicia a separação dos homólogos (anáfase), durante a primeira divisão da meiose. O cromossomo com os alelos **AA** emparelha-se com o cromossomo homólogo **aa**, e o mesmo acontece com os cromossomos portadores dos alelos **BB** e **bb**. Na casela da direita, está representado o posicionamento alternativo para o segundo par de cromossomos em relação ao primeiro par, isto é, **bb** e **BB**.



Figura 4: Na casela da esquerda, estão representados os emparelhamentos envolvendo as quatro cromátides de cada par de cromossomos homólogos (por exemplo, **A** com **a** e **A** com **a**) e não entre apenas duas, como é representado atualmente na maioria dos livros didáticos e nas Figuras 2 e 3 desta atividade. Na casela da direita, está representado posicionamento alternativo para o segundo par de cromossomos em relação ao primeiro par.

II) Respostas para o item “Entendendo a Atividade”

- 1) Cada bastão de massa de modelar representa um cromossomo, sendo que cada cromossomo, de uma ponta à outra, contém apenas uma molécula de DNA. Após a duplicação, cada cromossomo passa a ter duas cromátides idênticas (cromátides-irmãs), sendo que cada uma delas contém apenas uma molécula de DNA.
- 2) Na **atividade I** os cromossomos que foram representados são homólogos, portanto, portadores dos mesmos alelos do gene em questão. Após a duplicação, cada cromossomo passa a ser constituído de duas cromátides idênticas (cromátides-irmãs), já que uma foi copiada da outra.
- 3) A duplicação ocorre por um mecanismo de cópia semiconservativa da molécula de DNA que compõe o cromossomo, portanto, se o alelo presente em uma cromátide é **A**, a sua cromátide-irmã, copiada semiconservativamente da cromátide original, terá também o alelo **A**.

- 4) Dois posicionamentos são possíveis.
- 5) Na primeira divisão da meiose ocorre o emparelhamento dos cromossomos homólogos e a sua subsequente separação e migração para polos opostos e a inclusão de cada um deles em células diferentes. Na segunda divisão ocorre a separação das cromátides-irmãs num processo semelhante à mitose.
- 6) Ao final da meiose, cada **célula AaBb** forma quatro gametas, porém, só de dois tipos: por exemplo, **AB**, **AB**, **ab** e **ab**. Uma outra célula **AaBb**, dependendo da posição relativa dos cromossomos portadores dos dois genes em questão, poderá formar os outros dois tipos de gametas possíveis, isto é, **Ab**, **Ab**, **aB** e **aB**.
- 7) Considerando-se que várias células entram em meiose na formação dos gametas de um indivíduo **AaBb**, ele produzirá, no total, quatro tipos de gametas: **AB**, **ab**, **Ab** e **aB**.

- 8) Sim, porque os cromossomos homólogos se separam na primeira divisão da meiose, separando, consequentemente, os alelos do gene em células distintas, como mostra a parte superior (segregação) da Figura 2.
- 9) Sim, porque os cromossomos não homólogos posicionam-se aleatoriamente na placa equatorial, resultando na segregação independente dos genes localizados em cromossomos não homólogos, como mostra a parte inferior da Figura 2.

III) Respostas para os problemas:

- 1) Os seres vivos herdam de seus progenitores as informações que permitem produzir as características básicas de sua espécie, além das características individuais. Essas informações estão contidas nos genes (do grego *genes* = nascer; que pode ser entendido como origem), que nos indivíduos de reprodução sexuada são transmitidos de pais para filhos pelos gametas. Lembre-se de que os genes são segmentos de moléculas de DNA, o principal constituinte dos cromossomos.
- 2) Com exceção das hemácias maduras e de algumas células do fígado, as células de todos os seres humanos normais, inclusive as de seus progenitores, possuem 46 cromossomos. Se os gametas tivessem 46 cromossomos como a maioria das do corpo, os indivíduos da geração seguinte teriam 92 cromossomos em suas células, ou seja, número de cromossomos dobraria a cada geração. Entretanto, isso não acontece, o número de cromossomos nas células é o mesmo ao longo das gerações. Esta constância no número de cromossomos em cada célula e, portanto, dos genes durante as gerações, é uma consequência do processo de divisão celular conhecido como meiose, que origina gametas, células que contêm metade do número de cromossomos característicos de cada espécie e são denominadas haploides (simbolizadas por **n**). Os cromossomos contidos em cada gameta são diferentes entre si e representam um homólogo de cada par de cromossomos da célula diploide que lhe deu origem (simbolizada por **2n**). Eles podem ser todos de origem paterna, ou todos de origem materna, ou qualquer alternativa possível de mistura entre os cromossomos recebidos do pai e da mãe.
- 3) A trissomia do cromossomo 21 pode ser causada por um erro durante a meiose, no caso, pela não separação (não disjunção) dos dois cromossomos 21. O processo de não disjunção pode ocorrer: a) na primeira divisão da meiose, produzindo ao final da meiose dois gametas com dois cromossomos 21 e dois gametas sem cromossomo 21; ou b) na segunda divisão da meiose produzindo dois gametas com um cromosso-

mo 21, um gameta com dois cromossomos 21 e um gameta sem o cromossomo 21. Estes eventos de não disjunção podem ocorrer nas meioses de qualquer um dos parentais, mas é mais frequente nas das mulheres, e, além disso, a frequência de não disjunção aumenta com a idade materna. A fecundação de um óvulo contendo um total de 24 cromossomos, sendo um de cada tipo, além de um cromossomo **21 extra**, por um espermatozoide portador de 23 cromossomos (um de cada tipo) formará um embrião com um total de 47 cromossomos, sendo 22 pares de cromossomos homólogos e **três cromossomos 21**. Este tipo de situação pode ser simulado usando-se uma atividade semelhante à apresentada.

- 4) Sim, pois ocorre a fusão (fecundação) de dois gametas, sendo que ambos são provenientes do mesmo indivíduo.
- 5) A importância da reprodução sexuada consiste na produção de indivíduos com características diferentes uns dos outros e também diferentes de seus pais. A mistura do material hereditário de dois indivíduos permitirá o aparecimento de uma descendência variada sob o ponto de vista genético. Esta mistura pode ocorrer durante a formação dos gametas e/ou durante a fertilização. Como já citado, no caso dos indivíduos **AaBb**, em que os dois pares de genes estavam localizados em cromossomos distintos, há duas possibilidades de posicionamento na metáfase I e na anáfase I (Figs. 2 [parte inferior], 3 e 4), com a formação de 4 tipos (2^2) de gametas: **AB**, **Ab**, **aB**, **ab**. A possibilidade de formação de diferentes tipos de gametas (por **recombinação intercromossômica**, que resulta da migração aleatória dos cromossomos de origens paterna e materna para os polos da célula durante a anáfase da meiose) aumenta proporcionalmente ao número de cromossomos. Por exemplo, nos humanos em que existem 23 pares de cromossomos haverá a possibilidade da formação de 2^{23} tipos de espermatozoides e igual número de tipos de óvulos. O total de possibilidades de formação de diferentes embriões será de $2^{23} \times 2^{23}$, ou seja, a possibilidade de ocorrer a mesma associação de cromossomos de origem materna e paterna em embriões originários de diferentes eventos de fecundação é quase impossível. Além desta recombinação intercromossômica (entre todos os cromossomos de origem paterna e materna) pode ocorrer também a **recombinação intracromossômica**, ou seja, aquela resultante da permutação (troca) de segmentos dos cromossomos homólogos de cada par durante o emparelhamento destes na meiose.

6) Como o número diploide de cromossomos é igual a 10, ou seja, cinco pares de cromossomos homólogos, significa que durante a primeira divisão da meiose haverá o emparelhamento dos homólogos em cada um dos cinco pares de cromossomos, e como o posicionamento, e o subsequente deslocamento de um dos homólogos de um determinado par em direção aos polos da célula, é totalmente independente em relação ao posicionamento e deslocamento dos homólogos dos demais pares de cromossomos, haverá 2^5 associações possíveis de cromossomos de origem paterna e materna durante a formação dos gametas, isto é, 32 possibilidades.

7) As leis de Mendel são consequência dos processos de meiose que ocorrem nos organismos diploides e com reprodução sexuada, e podem ser expressas como:

- na meiose, os dois alelos de cada gene separam-se e se distribuem igualmente nos produtos da meiose, ou seja, nos gametas;
- na meiose os alelos de origem paterna e materna de um determinado gene separam-se independentemente dos alelos de outros genes localizados em cromossomos não homólogos.

Isto implica que os cromossomos contêm genes e que os cromossomos não homólogos separam-se independentemente na meiose.

BIBLIOGRAFIA E

LEITURA COMPLEMENTAR

AMABIS, J. M.; MIYAKI, C. Y., MORI, L. & SILVEIRA, R. V. M. 2002. Construindo Sempre – Programa de Educação continuada. Aperfeiçoamento de Professores (PEBII) – Módulo I – Biologia. Secretaria de Estado da Educação de São Paulo e Universidade de São Paulo. Disponível na página (consultada em 30/09/2010): <http://www.ib.usp.microgene/files/biblioteca-17-PDF.pdf>

GRIFFITHS, A.J.F.; MILLER, J.H.; SUZUKI, D.T.; LEWONTIN, R.C. & GELBART, W.M. 2000. “An introduction to Genetic analysis”. 7th ed. New York: W. H. Freeman.

GRIFFITHS, A. J. F.; WESSLER, S. R.; LEWONTIN, R. C. & CARROLL, S. B. 2009. “Introdução à Genética”. 9^a ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos alunos do curso de Ciências Biológicas, matriculados, de 1995 a 2006, na disciplina Genética (então BIO-201), que muito contribuíram para o aperfeiçoamento de uma das aulas práticas, na qual se baseia a presente proposta de atividade, e à Profa. Eliana Maria B. Dessen pelas sugestões e revisão cuidadosas da versão inicial.

Esse trabalho contou com apoio financeiro da Pró-Reitoria de Graduação da Universidade de São Paulo – Projeto ProMat (2003-2005) (<http://www.ib.usp.br/microgene/files/manuais-7-PDF.pdf>).