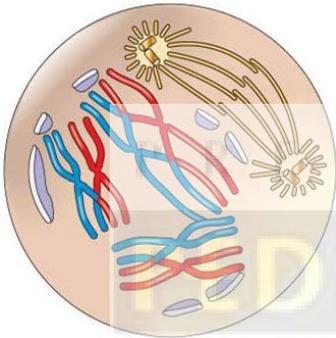


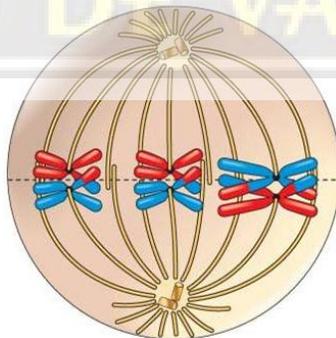
UNIDAD I: CÉLULA

DIVISIÓN CELULAR II

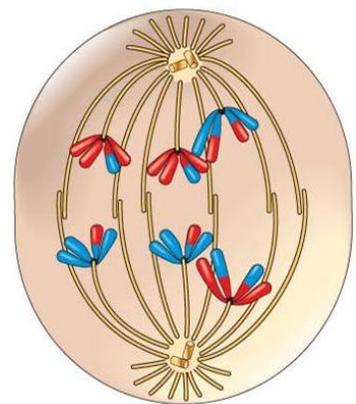
PROFASE I



METAFASE I



ANAFASE I



SEPARACIÓN DE LOS CROMOSOMAS HOMÓLOGOS EN MEIOSIS I

1. SIGNIFICADO BIOLÓGICO DE LA MEIOSIS

Un núcleo diploide contiene dos versiones de cada uno de los cromosomas, uno que proviene del padre (cromosoma paterno) y otro de la madre (cromosoma materno). En la especie humana se cuenta con **46 cromosomas**, de los cuales **22 pares son autosómicos** y **un par sexual**. Estas dos versiones constituyen un par de **cromosomas homólogos** y en la mayoría de las células mantienen una existencia completamente independiente, constituyendo cromosomas separados. Cuando cada cromosoma es duplicado por replicación del ADN (período **S** del ciclo celular) las copias gemelas de cada cromosoma se mantienen al principio estrechamente asociadas y son denominadas **cromátidas hermanas**.

La meiosis tiene como objetivo **reducir el número de cromosomas, establecer reestructuraciones en los cromosomas homólogos** mediante intercambios de material genético y finalmente esta directamente **relacionada con la sexualidad** y por consecuencia en la supervivencia y evolución de las especies.

En una división nuclear mitótica, cada cromátida se separa de su hermana en anafase y se convierte en un cromosoma individual, por lo que cada una de las dos células hijas recibirá una copia de cada cromosoma paterno y otra de cada cromosoma materno. En contraste, la **meiosis** es un mecanismo de división nuclear que permite la obtención de **células haploides (n)**, a partir de **células diploides (2n)**, con diferentes combinaciones alélicas, lo cual es fundamental para comprender la **reproducción sexual**. Un **gameto haploide** producido por una división meiótica posee la mitad del número original de cromosomas (solo un cromosoma en lugar de un par de cromosomas homólogos).

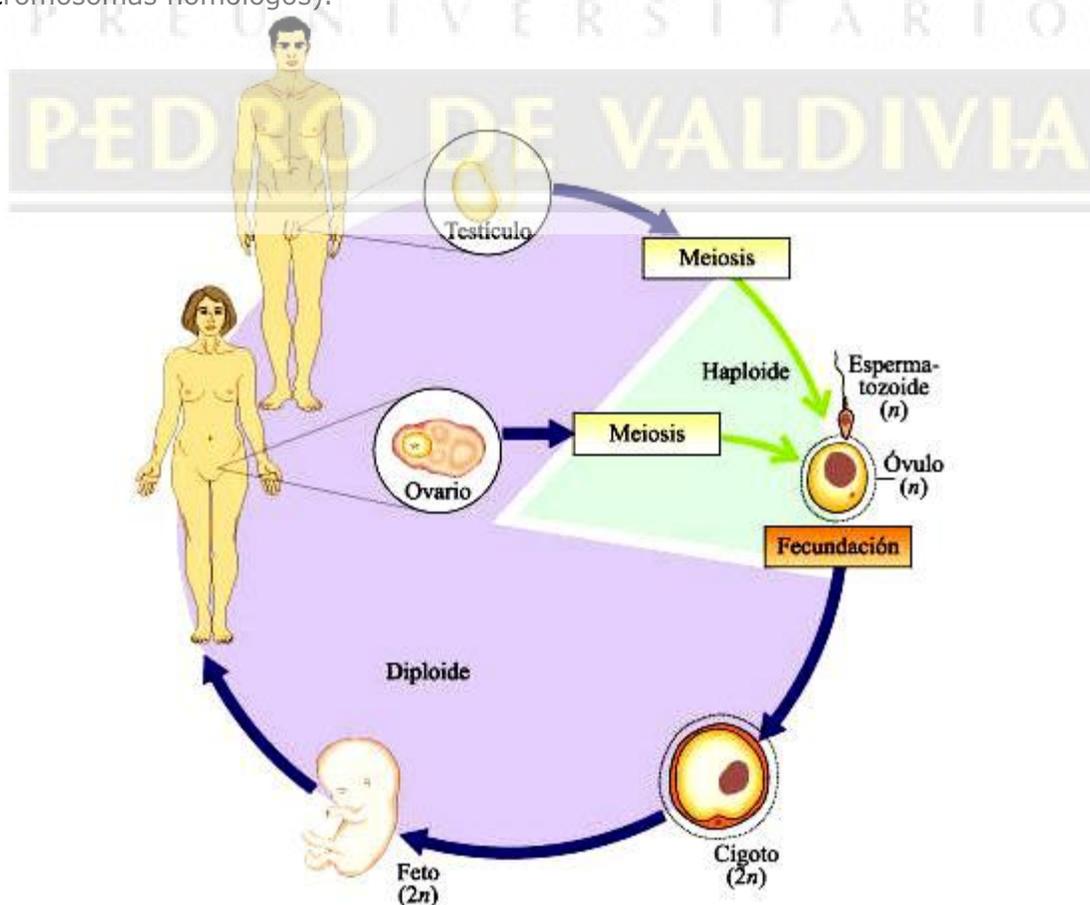


Figura 1. Meiosis y Reproducción sexual.

2. MECANISMO DE LA MEIOSIS

La meiosis consta de dos divisiones sucesivas tanto nucleares como de la célula, con una única replicación del ADN. El producto final, en términos generales, es cuatro células haploides, esto es cada célula poseedora de un solo set de cromosomas (n), todos ellos no homólogos entre sí (Figura 2).

PRIMERA DIVISIÓN MEIOTICA (MEIOSIS I)

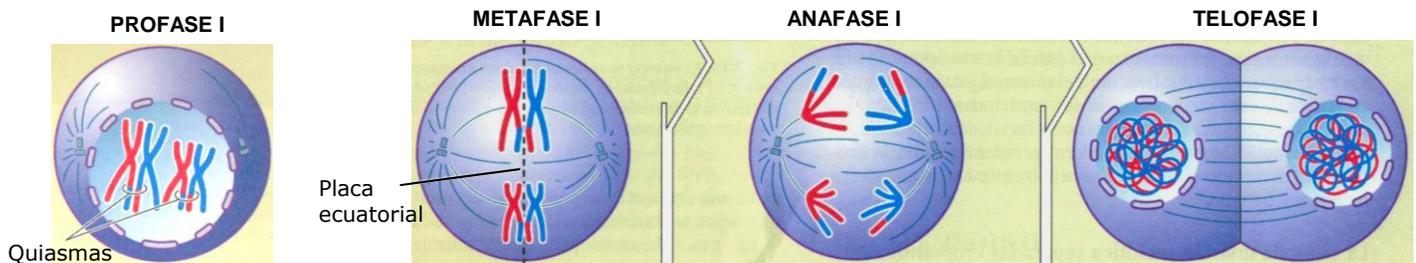


Figura 2. Etapas de la meiosis I.

PROFASE I

En esta fase suceden los acontecimientos más característicos de la meiosis. La envoltura nuclear se conserva hasta el final de la fase que es cuando se desintegra, al mismo tiempo desaparece el nucleolo y se forma el huso. En esta etapa los cromosomas homólogos se aparean punto por punto en toda su longitud. Este apareamiento puede comenzar bien por el centro o por los extremos y continuar a todo lo largo. Cuando los homólogos se aparean cada gen queda yuxtapuesto con su homólogo. Los pares de cromosomas homólogos aparecen íntimamente unidos: **bivalentes**. Se puede ya observar que cada cromosoma tiene sus dos cromátidas. Mientras están estrechamente unidos tienen lugar roturas entre cromátidas próximas de cromosomas homólogos que intercambian material cromosómico. Este intercambio se llama **entrecruzamiento** o **sobrecruzamiento** (**crossing-over**) y supone una redistribución cromosómica del material genético. Aunque los entrecruzamientos se producen en esta fase no son visibles, se apreciarán más tarde en forma de **quiasmas**. Al final de la profase la envoltura nuclear ha desaparecido totalmente y ya se ha formado el huso acromático.

Entrecruzamiento (crossing-over)

El número de variantes gaméticas puede aumentar significativamente como consecuencia de un tipo de recombinación génica denominado entrecruzamiento, que ocurre durante la profase de la primera división meiótica. En este caso, se intercambian partes entre los cromosomas homólogos. En promedio, ocurren dos a tres entrecruzamientos en cada par de cromosomas humanos durante la meiosis. El proceso de entrecruzamiento implica la ruptura del ADN de una cromátida paterna y lo propio en la zona equivalente de una cromátida materna, con el consiguiente intercambio de fragmentos de una cromátida a otra. Las consecuencias del entrecruzamiento pueden ser observadas citológicamente ya en la profase de la primera división meiótica: las cromátidas hijas están estrechamente unidas en toda su extensión formando los bivalentes y los cromosomas homólogos duplicados (materno y paterno) pueden verse físicamente conectados en puntos

específicos denominados **quiasmas**, correspondientes al sitio en el que se produjo el entrecruzamiento de dos cromátidas no hermanas, cada una perteneciente a cada cromosoma homólogo. En este estadio de la meiosis, cada par de cromosomas homólogos duplicados, o bivalente, posee al menos un quiasma. Muchos bivalentes contienen más un quiasma, indicando que pueden ocurrir múltiples entrecruzamientos entre homólogos (Figura 3).



Figura 3. Entrecruzamiento o crossing-over.

METAFASE I

Los bivalentes se disponen sobre el plano ecuatorial de la célula, pero lo hacen de tal forma que los dos cinetocoros que tiene cada homólogo se orientan hacia el mismo polo, y en el otro cromosoma ocurre lo mismo, pero orientados al polo opuesto (Figura 4).

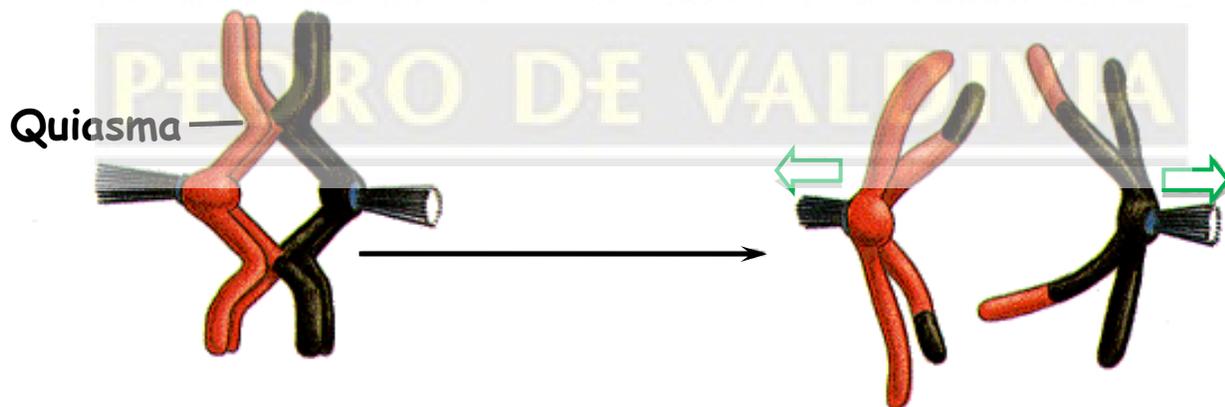


Figura 4. Orientación de los cinetocoros.

Permutación cromosómica

La recombinación génica es consecuencia de la distribución aleatoria (al azar) de los cromosomas homólogos maternos y paternos entre las células hijas de la división I de la meiosis (permutación cromosómica). Simplemente por este proceso de separación al azar de los homólogos uno puede obtener 2^n distribuciones distintas, siendo n el número haploide de cromosomas: así, para la especie humana cada individuo podrá producir $2^{23} = 8,4 \times 10^6$ gametos diferentes.

Es importante hacer notar que es durante la Profase I donde ocurre el evento de variabilidad genética mas importante; el entrecruzamiento entre cromátidas no hermanas de cromosomas homólogos (cromátidas homólogas), el cual es potenciado por la permutación cromosómica que ocurre en Metafase I.

ANAFASE I

Los cromosomas solo presentan un centrómero para las dos cromátidas. Debido a esto, se separan a polos opuestos cromosomas completos con sus dos cromátidas (Figura 5). **No se separan las cromátidas, sino los cromosomas dobles.** Esta **disyunción** o separación de los cromosomas da lugar a una reducción cromosómica. Como consecuencia, desaparecen los quiasmas. La distribución al azar de los cromosomas es una de las fuentes de variabilidad, ya que pueden producirse como consecuencia de este proceso una gran cantidad de gametos (2^n , siendo n el número haploide).

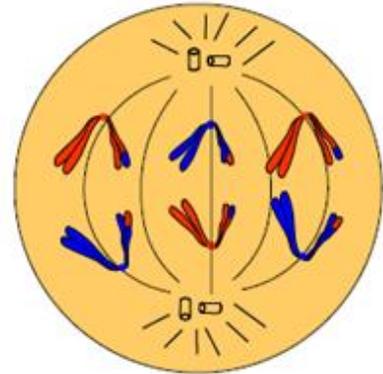


Figura 5. Separación de cromosomas homólogos.

TELOFASE I

Origina dos células hijas cuyos núcleos tienen cada uno n cromosomas con dos cromátidas hermanas cada uno.

INTERCINESIS

Puede ser variable en su duración, incluso puede faltar por completo de manera que tras la **telofase I** se inicia sin interrupción la segunda división. En cualquier caso, nunca hay síntesis de ADN.

INTERFASE

Puede ser variable en su duración, incluso puede faltar por completo de manera que tras la **telofase I** se inicia sin interrupción la segunda división. En cualquier caso, nunca hay síntesis de ADN; es decir, es una interfase sin periodo **S**.

SEGUNDA DIVISIÓN MEIÓTICA (MEIOSIS II)

En todo sentido puede interpretarse como una mitosis normal en la que las células al dividirse son haploides. Durante la segunda división meiótica, Las cromátidas hermanas se separan durante anafase II. Surgen así dos células haploides (n/c) por cada célula que se divide (Figura 6).

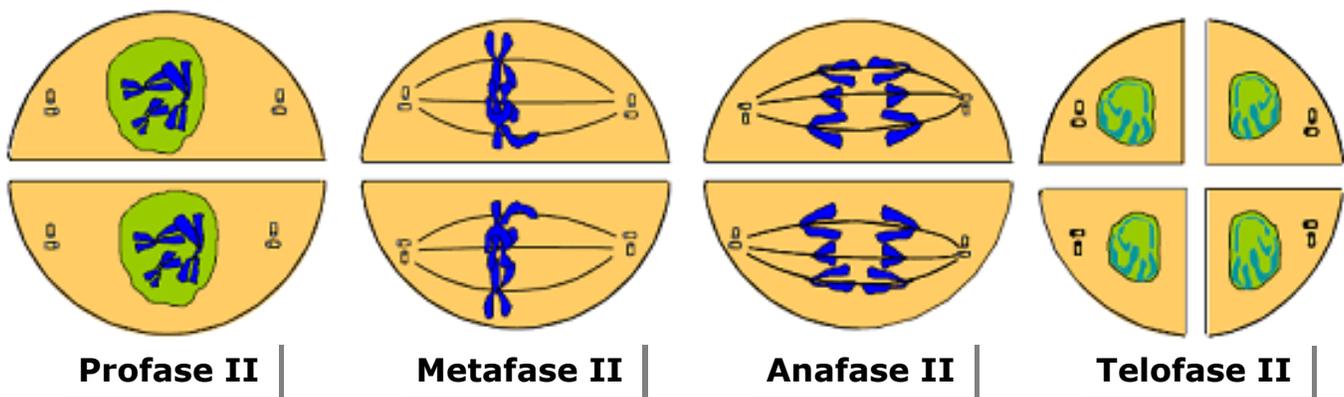


Figura 6. Segunda división meiótica.

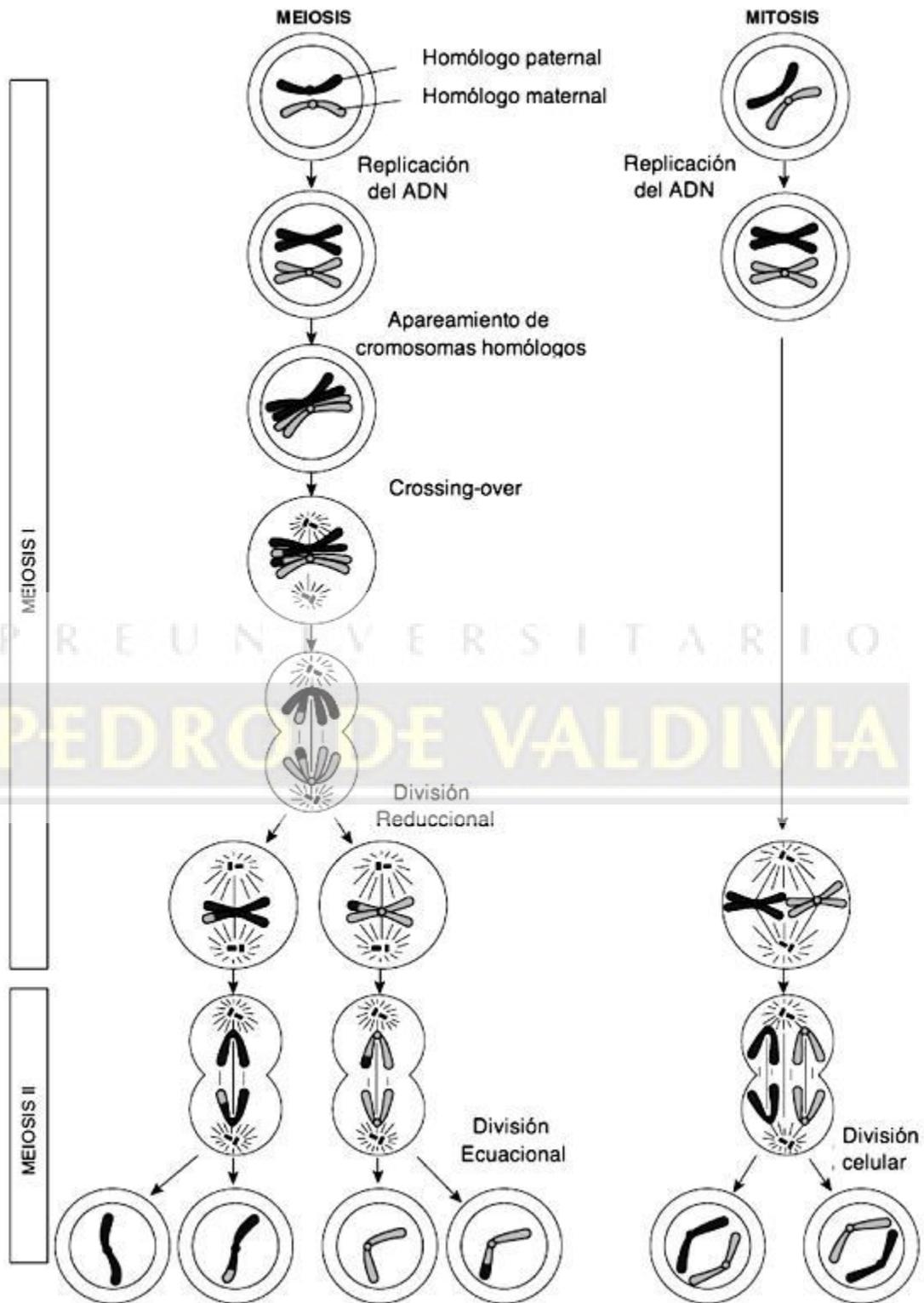


Figura 7. Comparación entre Mitosis y Meiosis.

- VERDADERO (V) o FALSO (F). Colocar la V o F, según corresponda
- a).....La segunda división meiótica es reduccional.
 - b).....La anafase I y la II, poseen el mismo número de cromosomas.
 - c).....Las células producto de la meiosis I y de la meiosis II son haploides.
 - d).....Las células haploides al igual que las diploides experimentan meiosis.
 - e).....Toda célula que pasa por intercinesis necesariamente es haploide.
 - f).....En profase I y II se forman tétradas o cromosomas bivalentes.

ACTIVIDAD

El esquema presenta las dos células que participan en la fecundación.



Al respecto es correcto plantear que
(Fundamente sus respuestas)

- a) ¿La célula **A** posee la mitad de moléculas de ADN que la célula **B**?
.....
- b) ¿La célula **B** tiene mayor número de cromátidas que la célula **A**?
.....
- c) ¿La célula **A** y **B** tienen el mismo número de cromosomas?
.....

3. GAMETOGÉNESIS

Proceso que ocurre en las gónadas a través del cual se forman los gametos; células haploides especializadas en la reproducción. Comprende tres grandes etapas; **la primera etapa es de proliferación de las CPG (células primordiales germinales)**, células diploides (2n) las que a través de **mitosis sucesivas aumentan en número**, dando origen a los gonios, los que a su vez continúan dividiéndose por mitosis. Continúa una **etapa de crecimiento**; en la cual los gonios duplican el DNA y aumentan de tamaño originando a los citos primarios, los que finalmente en **la etapa de Maduración o Meiosis** forman a los espermatozoides y a los óvulos; células haploides (n).

La formación de gametos masculinos se denomina **espermatogénesis** y los gametos femeninos **ovogénesis** (Figura 8).

La **espermatogénesis** ocurre en los testículos a partir de las **espermatogonias**; células diploides (2n). Estas células se multiplican repetidamente por mitosis (fase de multiplicación o proliferación), después aumentan de tamaño y se transforman en **espermatocitos primarios** (fase de crecimiento). Cada uno de ellos, tras la primera división meiótica, se transforman en espermatocitos secundarios (n cromosomas), y en la segunda división meiótica se forman las espermátidas. Estas espermátidas sufren una serie de transformaciones morfológicas convirtiéndose en espermatozoides, proceso conocido como **espermiohistogénesis**.

La ovogénesis forma los óvulos en los ovarios a partir de las ovogonias (2n cromosomas). Las ovogonias pasan por una fase de proliferación y de crecimiento transformándose en ovocitos primarios. Estos, en la fase de maduración, tras la primera división de la meiosis se transforman en dos células de distinto tamaño, una grande, ovócito de segundo orden, y otra pequeña, primer corpúsculo polar o polocito I. Ambos sufren la segunda división meiótica originando un óvulo y un corpúsculo polar o polocito II.

La ovogénesis y la espermatogénesis tienen algunas diferencias en cuanto a la duración de las etapas, distribución de citoplasma de las células hijas y a la modificación de éstas, pero tienen etapas similares, las cuales se indican en la tabla 1.

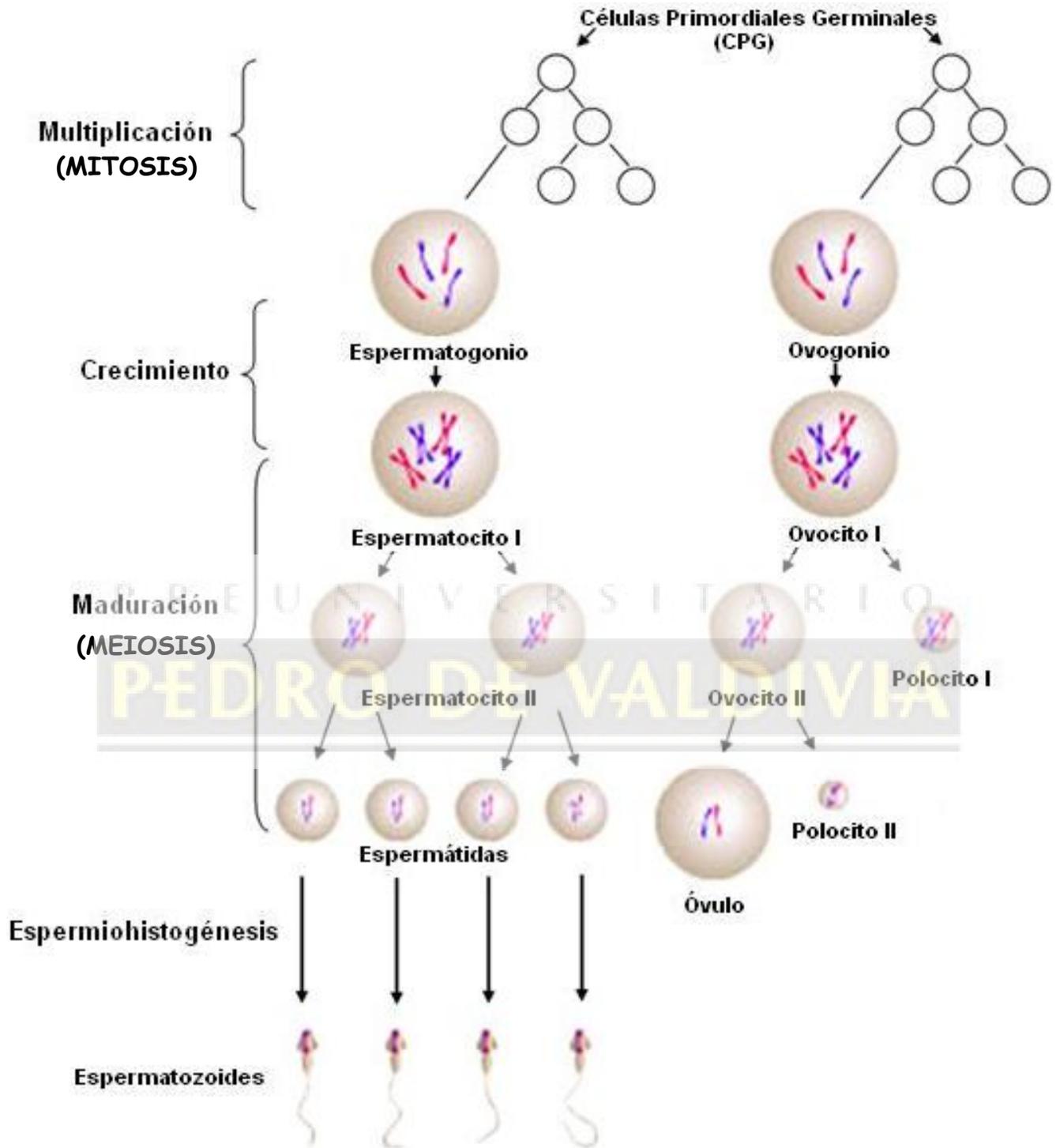


Figura 8. Espermatogénesis y Ovogénesis.

Tabla 1. Paralelo entre la Gametogénesis Femenina y Masculina.

Etapas de la Gametogénesis	Ovogénesis	Espermatogénesis
Proliferación (Multiplicación)	Ocurre solamente en la etapa embrionaria. En esta etapa las células germinales primordiales (CPG) se dividen por mitosis dando origen a los ovogonios (2n y 2c)	Comienza en la etapa embrionaria pero se detiene, para continuar en la pubertad. En esta etapa las CPG se dividen por mitosis dando dan origen a los espermatogonios (2n y 2c)
Crecimiento G₁ – S – G₂	Ocurre solamente en la etapa embrionaria. En esta etapa los ovogonios crecen, aumentan de tamaño y duplican su material genético ; transformándose en ovocitos I (2n y 4c)	Comienza en la pubertad. En esta etapa los espermatogonios crecen, aumentan de tamaño y duplican su material genético transformándose en espermatocitos I (2n y 4c)
Maduración o Meiosis	<p>La primera parte de la meiosis ocurre en la etapa embrionaria, quedando los ovocitos I detenidos en profase I ,permaneciendo así muchos años(desde 10 hasta 55 o 60 años,)que es más o menos el tiempo que puede transcurrir para que por efecto hormonal, se reinicie la Meiosis en cada ciclo ovárico.</p> <p>En cada ovulación la mujer da origen a un ovocito II (n y 2c) (pero detenido en Metafase II) y un polocito I, estas últimas células son útiles solo para la reducción cromosómica y rara vez se dividen.</p> <p>La segunda división meiótica del ovocito II solo finaliza cuando hay Fecundación dando por resultado un único gameto llamado óvulo (n y c).</p>	<p>Comienza en la pubertad y es un proceso continuo durante el resto de la vida del varón.</p> <p>Su duración es de solo semanas (6 a 8 semanas).</p> <p>La primera división meiótica da por resultado 2 células hijas llamadas espermatocitos II (n y 2c), luego estas células experimentan su segunda división meiótica y originan 4 células haploides de pequeño tamaño, denominadas espermátidas (n y c).</p> <p>Finalmente las espermátidas experimentan un cuarto proceso llamado espermiohistogénesis, el cual consiste en un cambio morfológico, para transformar a las espermátidas en espermatozoides (n y c).</p>

4. MUTACIONES CROMOSÓMICAS

Ocasionalmente ocurren en los gametos las no disyunciones, esto significa que los cromosomas homólogos no logran separarse en la meiosis I o en la meiosis II las cromátidas no logran separarse, lo cual produce cambios que pueden afectar el número de cromosomas. Tales alteraciones pueden ser clasificadas como **mutaciones numéricas** .También en los cromosomas pueden ocurrir cambios en su estructura alteraciones denominadas y **mutaciones estructurales**. A veces estas alteraciones pueden provocar consecuencias perjudiciales a los individuos, alterando su viabilidad o su fertilidad. También puede ocurrir, que los cambios cromosómicos se mantengan como parte de la variabilidad genética entre los organismos, contribuyan al cambio evolutivo y al origen de nuevas especies.

• **Mutaciones numéricas**

Las alteraciones numéricas pueden tener su origen en la **mitosis** o en la **meiosis** y en general se producen por una falla en la migración de los cromosomas, se reconocen dos tipos de alteraciones numéricas: las **Aneuploidías** y las **Poliploidías**.

➤ **Aneuploidías:** Implican el déficit o el exceso de uno o más cromosomas. La condición disómica normal es tener un par de cromosomas homólogos de cada tipo. Si se tiene un cromosoma extra en un par se denomina **trisomía** y si carece de un miembro del par cromosómico se denomina **monosomía**. Suelen ser el resultado de una división **meiótica** o **mitótica**, en la cual los cromosomas no se separan en la anafase, es decir, no hay disyunción. En la **meiosis**, la **no disyunción cromosómica puede ocurrir en la primera o segunda división meiótica o en ambas**. A continuación se revisará una representación de la no disyunción en los cromosomas sexuales del varón en la primera división meiótica y una no disyunción en la segunda división meiótica (Figura 9).

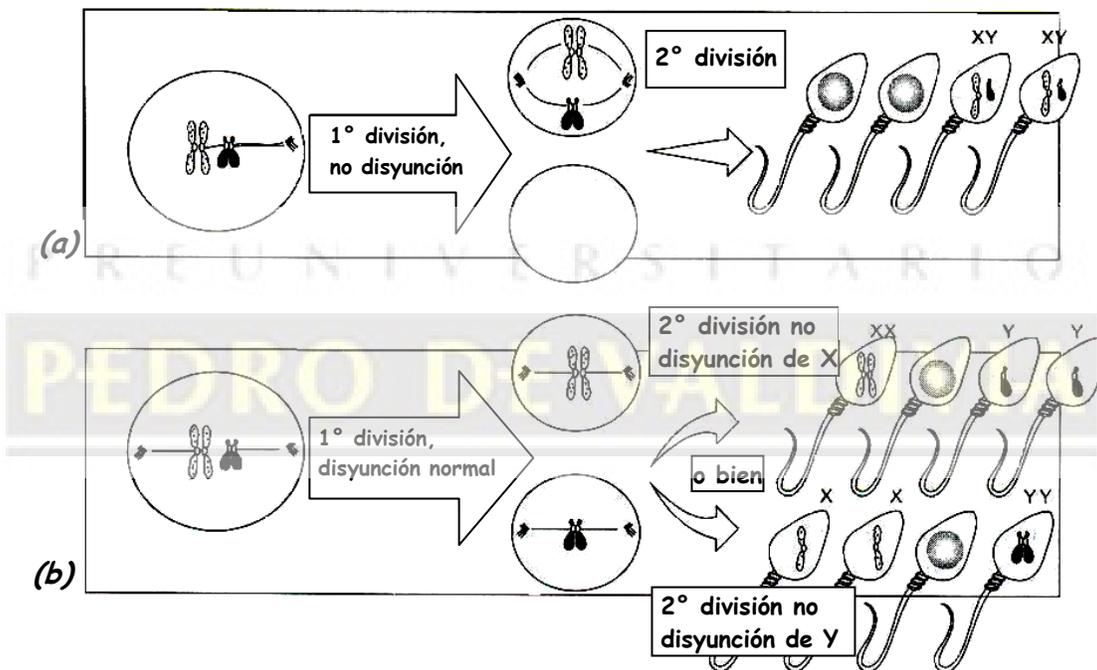


Figura 9. No disyunción de los cromosomas sexuales en el varón, **a)** no disyunción en la primera división meiótica. **b)** no disyunción en la segunda división meiótica. (Solo se muestran los cromosomas **X**, blancos punteados y los cromosomas **Y**, negros).

Revisando la representación de la **no disyunción** de la Figura 8, se observa lo siguiente:

a) no disyunción en la I división meiótica origina

- dos espermatozoides uno sin **X** y el otro sin **Y**.
- dos espermatozoides **XY**,

b) no disyunción en la II división meiótica del cromosoma X, hace que se formen:

- un espermatozoide con dos cromosomas **XX**.
- un espermatozoide sin cromosomas sexuales.
- dos espermatozoides con un **Y** cada uno.

c) **no disyunción en la II división meiótica del cromosoma Y, hace que se formen:**

- dos espermatozoides con un cromosoma **X** cada uno.
- un espermatozoide sin cromosoma **Y**.
- un espermatozoide con dos cromosomas **Y**.

Además de las alteraciones provocadas a nivel de los cromosomas sexuales la no disyunción también puede provocar alteraciones en los cromosomas autosómicos, cuyo ejemplo más notable lo constituye el **Síndrome de Down**, una trisomía del cromosoma 21.

Tabla 2. Mutaciones numéricas en cromosomas **autosómicos** y **sexuales**.

CARIOTIPO	NOMBRE COMÚN	DESCRIPCIÓN CLÍNICA
Trisomía 13	Síndrome de Patau	Defectos múltiples y la muerte a la edad de uno a tres meses.
trisomía 18	Síndrome de Edwards	Deformaciones del oído, defectos cardíacos, espasticidad, otras lesiones, muerte a la edad de un año.
Trisomía 21	Síndrome de Down	La frecuencia global es de alrededor de uno en 700 nacimientos vivos. La trisomía verdadera se observa con mayor frecuencia en niños de madres maduras (más de 40 años), pero puede ocurrir translocación causante del equivalente de la trisomía en hijos de madres jóvenes. Se caracteriza por un pliegue cutáneo sobre el ojo, grados variables de retardo mental, corta estatura, lengua saliente y con surcos, surco palmar transversal y deformidades cardíacas.
Trisomía 22	-----	Similar al síndrome de Down, pero con más deformidades esqueléticas.
XO	Síndrome de Turner	Corta estatura, arrugas notables en el cuello, algunas veces retardo mental ligero, degeneración ovárica en la vida embrionaria tardía, que da por resultado características sexuales rudimentarias; el género es femenino y no hay cuerpos de Barr.
XXY	Síndrome de Klinefelter	Varón con testículos que degeneran lentamente y crecimiento mamario, un cuerpo de Barr por célula.
XYY	Cariotipo XYY	Varón anormalmente alto con acné intenso, tendencia al retardo mental ligero.
XXX	Triple X	A pesar de tener tres cromosomas, se trata de mujeres bastante normales, por lo común infértiles.

- **Poliploidías:** Los individuos que sufren estas mutaciones poseen un número de cromosomas múltiplo del número normal. Las poliploidías se producen espontáneamente en la historia de la evolución. Este fenómeno se observa principalmente en vegetales donde es un proceso importante en la especiación. El 47% de las plantas con flores (angiospermas) actuales son poliploides. La diferencia con la aneuploidía es que aquí se trata de juegos cromosómicos extras, por lo tanto el organismo posee **3n, 4n, 6n**, etc.

5. MUTACIONES ESTRUCTURALES

Corresponden a rupturas que sufren espontáneamente los cromosomas y como consecuencia de ello, se **pierden o intercambian fragmentos entre cromosomas no homólogos**, esto origina cambios en el orden de los genes y patrones hereditarios alterados, dentro de estas mutaciones se encuentran:

- **Delección:** se "pierde" un segmento completo del cromosoma, si la delección es muy grande los organismos suelen ser no viables (Figura 10a).
- **Duplicación:** el segmento "perdido" puede incorporarse a su homólogo, por lo tanto en el cromosoma homólogo el segmento aparece repetido, (Figura 9b).
- **Inversión:** ocurren dos rupturas en un mismo cromosoma, el segmento gira en 180° y luego se reincorpora al mismo cromosoma. (Figura 10c).
- **Translocación:** a veces se transfiere una porción de un cromosoma a otro cromosoma no homólogo (Figura 10d).

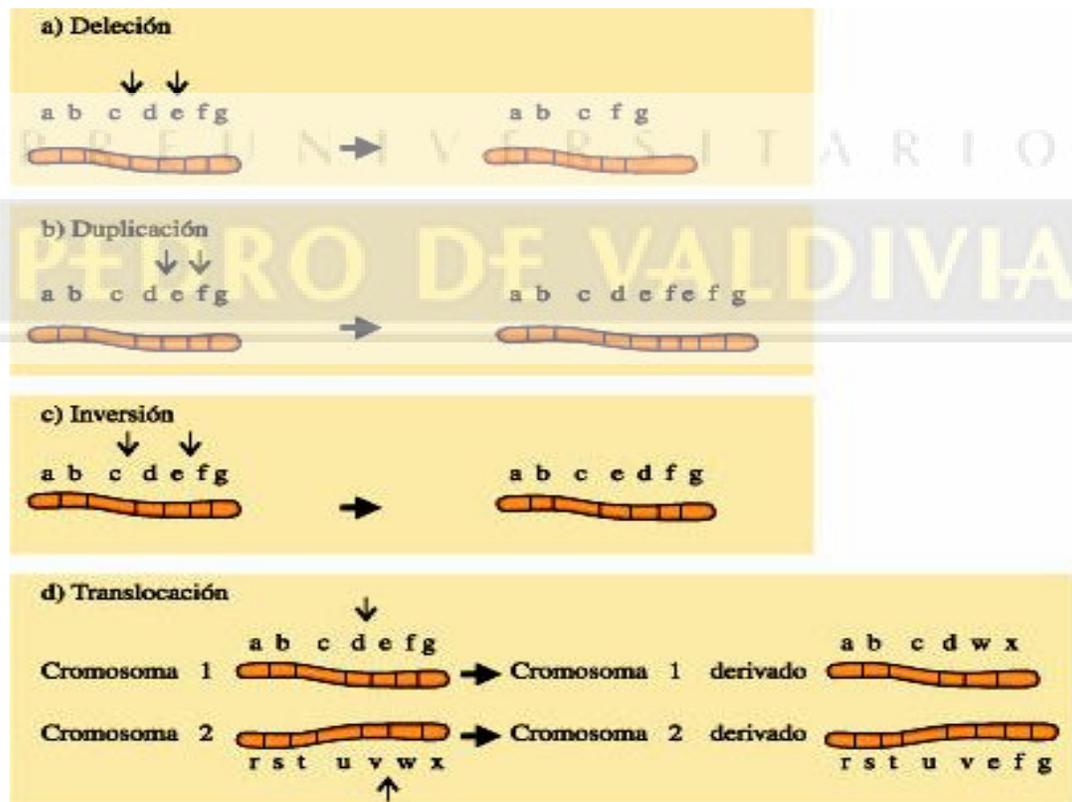


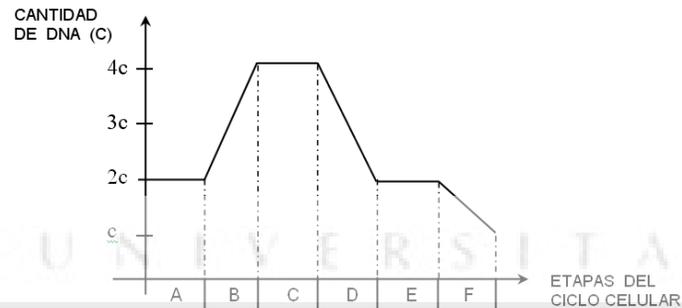
Figura 10. Mutaciones estructurales.

ACTIVIDAD DE DESARROLLO

1. Señale cuantos cromosomas hay en las siguientes células

- A) una espermátida
- B) un espermatogonio
- C) un espermatozoido secundario

2. Observe el siguiente gráfico de las variaciones que experimenta una célula en gametogénesis



Identifique las etapas que están representadas con letras

- A.....
- B.....
- C.....
- D.....
- E.....
- F.....

3. ¿Cuáles son los dos eventos de variabilidad genética más relevantes de la meiosis?

- 1.....
- 2.....

4. Si una célula diploide tiene en **G₁** **48 cromosomas** y **2c** en cantidad de DNA, en **G₂** tendrá
- A) cromosomas.
 B) en cantidad de DNA.
5. Si una célula tiene **40 cromosomas** en **G₁** y **2c** en cantidad de DNA señale el número de cromosomas y cantidad de DNA que tiene una célula al término de las siguientes fases:

Fase meiótica	N° de cromosomas	Cantidad de DNA
Profase I		
Profase II		

6. Señale el número de cromosomas que posee en humano

un espermatozoonio en Anafase Mitótica	
un ovocito I en Anafase I Meiótica	
un ovocito II en Anafase II Meiótica	

7. Si una célula tiene 32 cromosomas, ¿cuántas tétradas tendrá en Profase I meiótica?

Tendrá..... tétradas o cromosomas bivalentes.

Preguntas de selección múltiple

1. Si en un ejercicio teórico NO se considera el crossing-over y se indica que cierta célula de una especie diploide posee una dotación cromosómica igual a $2n=12$, ¿cuál sería la cantidad hipotética de gametos distintos que produciría?
 - A) 3 gametos.
 - B) 6 gametos.
 - C) 12 gametos.
 - D) 36 gametos.
 - E) 64 gametos.
2. Respecto de los cromosomas homólogos, es correcto señalar que
 - A) presentan diferente morfología.
 - B) portan genes no alélicos entre sí.
 - C) suelen encontrarse en el mismo gameto.
 - D) se separan durante anafase II de la meiosis.
 - E) portan información para las mismas características.
3. Sobre la espermiogénesis en el hombre, es correcto afirmar que la meiosis
 - I) no genera espermatozoides.
 - II) se observa solo en las gónadas.
 - III) reduce el número de cromosomas.

Es (son) correcta(s)

- A) solo I.
 - B) solo II.
 - C) solo III.
 - D) solo I y II.
 - E) I, II y III.
4. Respecto al espermatozoide en humanos, se puede señalar que
 - I) es haploide.
 - II) posee flagelo formado por microtúbulos
 - III) al igual que el ovocito II posee cromosomas dobles.

Es (son) correcta(s)

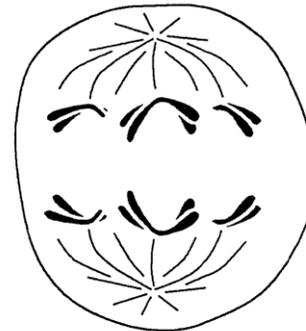
- A) solo I.
- B) solo II.
- C) solo III.
- D) solo I y II.
- E) I, II y III.

5. ¿Cuál de las siguientes alternativas resume mejor la meiosis?

	Apareo de cromosomas	Número de Divisiones	Resultado
A)	Si	2	2 células haploides
B)	Si	1	1 célula diploide
C)	Si	2	4 células haploides
D)	No	1	2 células diploides
E)	No	4	4 células haploides

6. La siguiente figura representa a una célula en

- A) metafase I.
- B) anafase I.
- C) telofase I.
- D) anafase II.
- E) profase II.



7. Si una célula somática en G_0 contiene 13 pg (picogramos) de ADN. ¿Cuántos picogramos de ADN debería contener una célula gamética de dicho individuo?

- A) 3,25
- B) 6,50
- C) 13,00
- D) 18,50
- E) 26,00

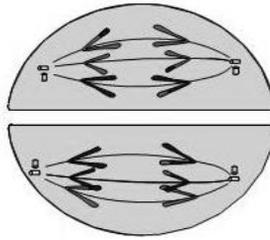
8. Diploidia significa que una célula

- I) presenta moléculas de ADN bicatenario.
- II) posee dos juegos de cromosomas homólogos.
- III) puede dividir su núcleo por mitosis.

Es (son) correcta(s)

- A) solo I.
- B) solo II.
- C) solo III.
- D) solo II y III.
- E) I, II y III.

9. Es correcto afirmar que en las células de la figura, se están



- A) separando cromátidas hermanas.
- B) movilizandolos cromosomas para formar la placa ecuatorial.
- C) separando cromosomas homólogos.
- D) formando las tétradas o bivalentes.
- E) uniendolos cromátidas homólogas.

10. Cada bivalente observado durante la meiosis está formado por

- A) cuatro pares de cromosomas apareados.
- B) dos cromátidas asociadas a un centrómero.
- C) dos cromosomas homólogos apareados.
- D) dos cromosomas no homólogos apareados.
- E) cualquier par de cromosomas apareados.

RESPUESTAS

Preguntas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Claves	E	E	E	D	C	B	B	B	A	C



DMDO-BC09

Puedes complementar los contenidos de esta guía visitando nuestra Web
<http://www.pedrovaldivia.cl/>