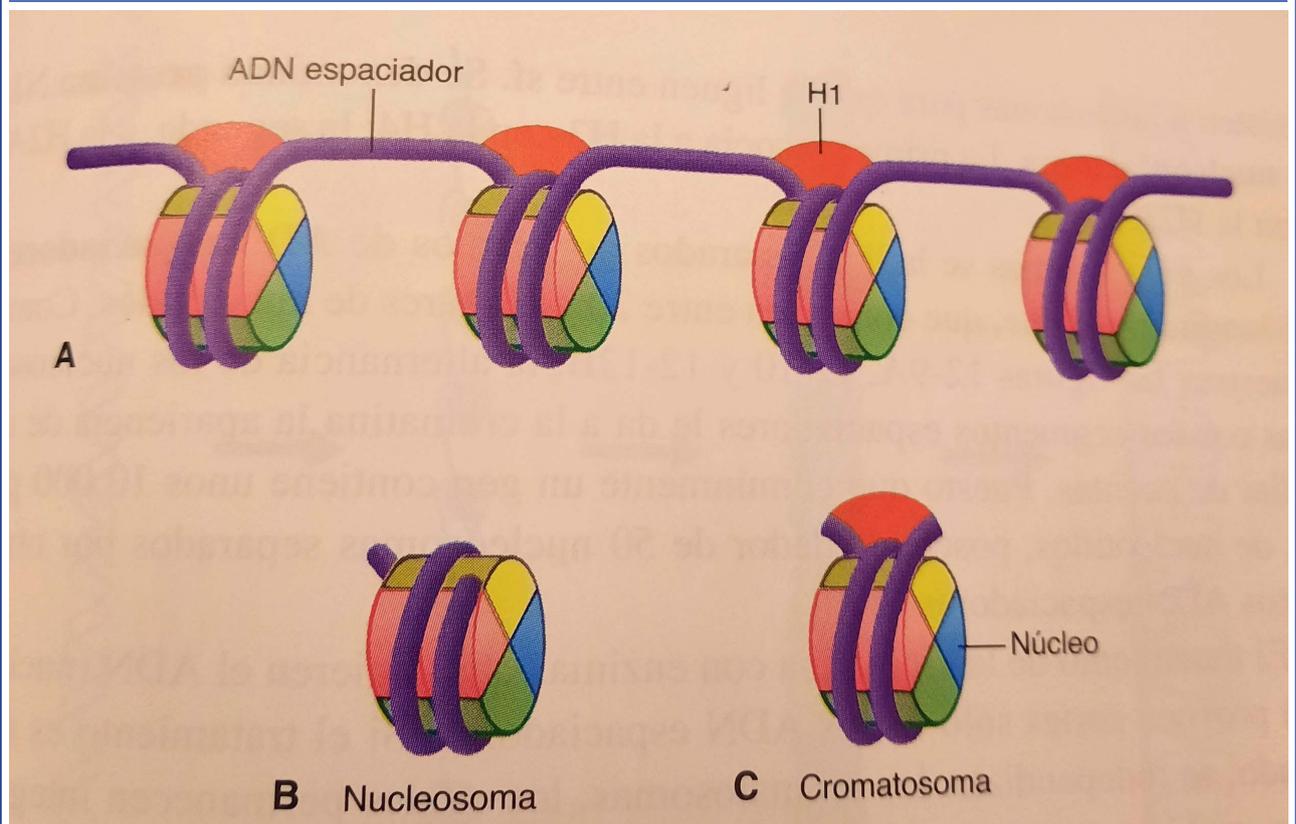




SERIE DIDÁCTICA Nº 95

# ORGANIZACIÓN CROMOSÓMICA Y COMPLEMENTO CROMOSÓMICO

BUDEGUER C.J.1 Y PASTORIZA A.



Budeguer, Carlos Jorge

Organización cromosómica y complemento cromosómico / Carlos Jorge Budeguer ; Adriana del Valle Pastoriza. - 1a edición para el alumno - San Miguel de Tucumán : Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Agronomía, Zootecnia y Veterinaria, 2024.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-754-361-2

1. Cromosomas. I. Pastoriza, Adriana del Valle. II. Título.  
CDD 572.87

# ORGANIZACIÓN CROMOSÓMICA Y COMPLEMENTO CROMOSÓMICO

Budeguer C.J.<sup>1</sup> y Pastoriza A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Cátedra de Genética. Facultad de Agronomía, Zootecnia y Veterinaria.  
Universidad Nacional de Tucumán

Organización cromosómica.....	1
Cromosomas .....	1
Funciones y constantes de los cromosomas.....	1
Morfología de los cromosomas.....	2
Clasificación de cromosomas.....	3
Estructura del cromosoma.....	3
A nivel de microscopio óptico .....	3
A nivel de microscopio electrónico.....	4
A nivel químico - molecular.....	4
Complemento cromosómico .....	5
Fase haploide y diploide .....	5
Cromosomas homólogos.....	6
Genomio y número básico .....	6
Terminología .....	6
Bibliografía .....	7

## Organización cromosómica

### *Cromosomas*

Las investigaciones de Griffith (1928) y de Avery y col. (1944), ayudaron a determinar que el ADN es el material que alberga la información genética, pero es importante determinar cómo se organiza el ADN para formar el genoma de los organismos. El **genoma** es la totalidad de dicha información, contenida en el ADN y que tiene todas las instrucciones para formar un nuevo organismo (De Robertis, 2012; Pierce, 2010).

Se denomina cromosoma (del griego *chroma*, color y *soma*, cuerpo) a cada una de las estructuras en que se organiza el ADN dentro del núcleo. Cada cromosoma es una molécula de ADN superenrollada (Griffiths et al, 2002). Un cromosoma eucariótico es una sola molécula de ADN que requiere mucho enrollamiento y empaquetamiento, cuyo grado cambia en el curso del ciclo celular<sup>1</sup>. Un cromosoma procariótico está formado por una molécula circular grande de ADN, que puede formar una serie de bucles (Pierce, 2015).

El ADN de cromosomas eucarióticos pasa por ciclos de enrollamiento y desenrollamiento a lo largo del ciclo celular. La **cromatina** es el ADN desenrollado totalmente dentro del núcleo y porta la información genética por estar constituido de ADN asociado a proteínas especiales llamadas **histonas**. La cromatina se observa en interfase, como una masa coloreada. Cuando el núcleo comienza el proceso de división, la cromatina inicia una condensación progresiva que finaliza en la formación de entidades discretas e independientes que llamamos cromosomas. Por lo tanto cromatina y cromosoma son dos aspectos morfológicos de una misma entidad celular.

Los cromosomas fueron observados en células de plantas por el botánico suizo Karl Wilhem von Nageli en 1842, y a su vez, por el belga Edouard Van Beneden en lombrices. El citólogo alemán Walther Flemming en 1882 definió inicialmente la cromatina como “la sustancia que constituye los núcleos interfásicos y que muestra determinadas propiedades de tinción”. Por ello las definiciones iniciales de cromosoma y cromatina son puramente citológicas. En 1889, Wilhen von Waldeyer dio el nombre de cromosoma que significa *cuerpo coloreado* en griego. La teoría de que los genes se localizan en los cromosomas es la *teoría cromosómica de la herencia*, y fue postulada por Walter Sutton, y en la misma época Theodor Boveri llegó a conclusiones similares (Pierce, 2015)

La definición biológica se alcanzó a principios del siglo XX, con el redescubrimiento de las Leyes de Mendel: el cromosoma constituye el material genético organizado (Pierce, 2010). Los “factores” que mencionó Mendel son los genes.

### **Funciones y constantes de los cromosomas**

Las funciones de los cromosomas son tres: *almacenar*, *replicar* y *transmitir* la información genética.

La información genética se *almacena* en las bases nitrogenadas de la molécula de ADN. Dichas bases son: adenina (A), timina (T), citocina (C) y guanina (G). Se replica cuando se autoduplica la molécula de ADN en el período *S* de la interfase del ciclo celular (a efectos de una posterior división celular). La información se *transmite* de célula a

---

<sup>1</sup>Ciclo celular: El ciclo de vida de una célula comprende la interfase y la mitosis. La interfase se subdivide en tres periodos llamados *G1*, *S* y *G2*. La duplicación del ADN ocurre durante el periodo *S*. Al cabo de la mitosis, las moléculas de ADN duplicadas en el periodo *S* se segregan en las células hijas (De Robertis-Hib, 2004).

célula por medio de la mitosis y de generación a generación de individuos por medio de la unión de gametas que se generaron por meiosis.

Por otra parte, los cromosomas poseen tres constantes:

- 1 Número: es constante para cada individuo de una determinada especie.
- 2 Forma: es constante entre los miembros de cada par homólogo
- 3 Tamaño: cada cromosoma puede variar entre 0,2 y 50 micrones de longitud y también es constante en cada organismo.

### **Morfología de los cromosomas**

La morfología de los cromosomas puede ser estudiada, mediante microscopía óptica en metafase de mitosis, ya que es la fase en que alcanzan el máximo grado de condensación (Figura 1).



Fig. 1 Cromosoma metacéntrico.

En el periodo G1 cada cromosoma está constituido por una **cromátida**. Luego del periodo S, cada cromosoma consta de dos cromátidas. Cada cromátida es una molécula de ADN, y una resulta de la replicación de la otra, por eso se las llaman “cromátidas hermanas”; las mismas están unidas por el **centrómero** (o constricción primaria). El centrómero tiene 3 funciones principales:

1. Es la zona del cromosoma que mantiene unidas a las cromátidas hermanas.
2. Vincula al cromosoma con la fibra del huso acromático en la metafase de mitosis y meiosis.
3. Facilita la migración de cada cromátida hacia los polos.

Los **brazos** son las porciones que resultan de dividir transversalmente al cromosoma, a nivel del centrómero. Cada brazo está formado por la mitad de dos cromátidas. Los cromosomas metacéntricos, submetacéntricos y acrocéntricos tienen dos brazos y los telocéntricos, tienen un solo brazo.

Entre las **constricciones secundarias** distinguimos:

- I. Constricciones secundarias propiamente dichas: son pequeñas estrangulaciones en cada una de las cromátidas. No están presentes en todos los cromosomas pero son constantes en los que las poseen, permitiendo su identificación.
- II. Organizadores nucleolares: son adelgazamientos del cromosoma que permite la formación de un cuerpo esférico llamado *satélite*, sirviendo éste para la identificación de cromosomas. En esta zona, llamada *NOR*, se hallan los genes que permiten la síntesis de ARN que constituyen los nucléolos. Los cromosomas que poseen satélites se llaman “SAT” o “satelizados”.

**Telómeros:** corresponden a los extremos de los cromosomas, cuyo ADN se replica de un modo distinto al resto del ADN. Su función es proteger los extremos de la molécula, que debido a su ubicación están expuestos al riesgo de fusionarse con el ADN de otros telómeros o puede ser degradado por enzimas nucleasas. Normalmente esto no ocurre porque el ADN telomérico se dobla sobre sí mismo en forma de lazo y es protegido por un capuchón de proteínas (De Robertis, 2004).

**Clasificación de cromosomas**

El centrómero ocupa diferentes posiciones a lo largo del cromosoma y esto sirvió a Darlington en 1936 para crear una clasificación de los cromosomas en cuatro tipos (Figura 2):

1. Metacéntricos (M): centrómero ubicado en la parte media del cromosoma (Figura 2D)
2. Submetacéntrico (SM): centrómero ubicado entre parte media y el extremo del cromosoma (Figura 2C)
3. Acrocéntrico (A): centrómero ubicado muy cerca del extremo del cromosoma (Figura 2B); obsérvese la presencia de satélites.
4. Telocéntrico (T): centrómero ubicado en el extremo del cromosoma (Figura 2A).

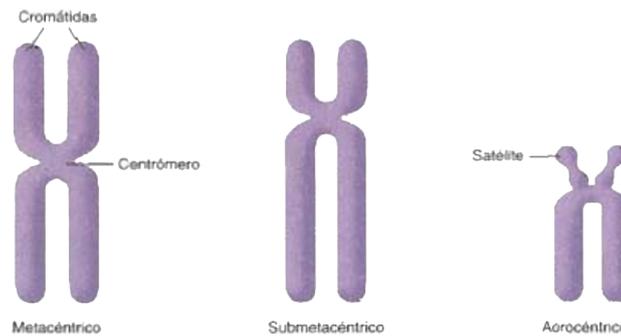


Fig. 2. Tipos de cromosomas según clasificación de Darlington. De De Robertis (2012).

Por otra parte, el sistema más usado para clasificar los cromosomas fue desarrollado por Levan y colaboradores en 1964 basada en la posición de la constricción primaria donde se encuentra localizado el centrómero, lo que origina dos brazos de longitud variable. La relación de los brazos se expresa mediante índices de proporcionalidad que comparan algunos parámetros (Lacadena, 1996):

- c: longitud total del cromosoma
- s: longitud del brazo corto
- l: longitud del brazo largo

**Diferencia cromosómica (d)** es la diferencia entre longitud de brazos:  $l - s$

**Relación cromosómica (r)** es la relación o cociente entre longitud de brazo largo y brazo corto:  $l / s$

**Índice centromérico ( $I_c$ )** es el valor que indica la ubicación del centrómero y el tipo de cromosoma de acuerdo a la clasificación de Darlington y es el más utilizado:

$$I_c = (s / c) \times 100$$

Este índice es importante porque su valor permite confeccionar cariogramas al clasificar los cromosomas de acuerdo al Cuadro 1.

**Cuadro 1: Clasificación de los cromosomas de acuerdo al valor del índice centromérico.**

Tipo de cromosoma (abreviación)	Localización de centrómero	Valor d	Valor r	Valor ic
Metacéntrico (M)	Punto medio	0	1	50
Metacéntrico (m)	Región media	0 – 2.5	1 – 1.7	50 – 37.5
Submetacéntrico (sm)	Región submedial	2.5 – 5	1.7 – 3	37.5 – 25
Subtelocéntrico (st)	Región subterminal	5 – 7.5	3 – 7	25 – 12.5
Telocéntrico (t)	Región terminal	7.5 – 10	7 - $\infty$	12.5 – 0
Telocéntrico (T)	Punto terminal	10	$\infty$	0

### Estructura del cromosoma

Se puede analizar la estructura de un cromosoma en 3 niveles distintos:

- A nivel de microscopio óptico
- A nivel de microscopio electrónico
- A nivel molecular o químico

#### A nivel de microscopio óptico

En interfase se observa la **cromatina** (*cromo* = color, *tina* = sustancia) que es una sustancia homogénea coloreada dentro del núcleo. Se colorea con colorantes básicos como la hematoxilina. En la cromatina se distingue la eucromatina que se observa más clara por tener menos condensación y la heterocromatina de color más intenso por estar más condensada.

En profase se observa el **cromonema**, que es la cromatina que va espiralizándose, en progreso hacia metafase. Toma el aspecto de hilos o hebras coloreadas. El aspecto típico en profase es el de finas hebras con corpúsculos llamados Cromómeros (*meros*= ovillos) que son enrollamientos de ADN que se colorean más fuertemente y permiten la identificación (Figura 3).

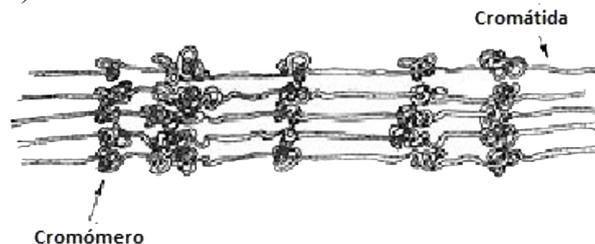


Fig. 3. Diferentes niveles de condensación de la cromatina. De Lacadena (1981)

En metafase se observan **cromátidas**, que es el máximo grado de condensación de la cromatina. En telofase comienza a desenrollarse la cromátida hasta llegar a interfase como cromatina.

En resumen cromatina, cromonema y cromátidas son distintos estadios funcionales de la misma molécula (ADN + proteínas). Esto se llama **Ciclo del Cromonema** y va de interfase a interfase.

Interfase	cromatina
Profase	cromonema
Metafase	cromátidas

### A nivel de microscopio electrónico

Por medio de microscopía electrónica se pudo dilucidar la ultraestructura de la cadena de ADN que está asociada a proteínas histónicas. Las **histonas** desempeñan un papel fundamental en el enrollamiento de la cromatina. Se trata de proteínas básicas cargadas positivamente, lo cual contribuye a la unión con las moléculas de ADN, en las que predominan las cargas negativas.

Existen cinco clases de histonas, llamadas H1, H2A, H2B, H3 y H4. Las cuatro últimas llevan el nombre de histonas nucleosómicas porque la molécula de ADN se enrolla alrededor de ellas para formar los **nucleosomas**, que constituyen las unidades básicas del enrollamiento cromatínico. En cada nucleosoma las histonas se asocian en un octámero compuesto por dos H2A, dos H2B, dos H3 y dos H4. La H1 une las histonas que forman el octámero (Figura 4A, B).

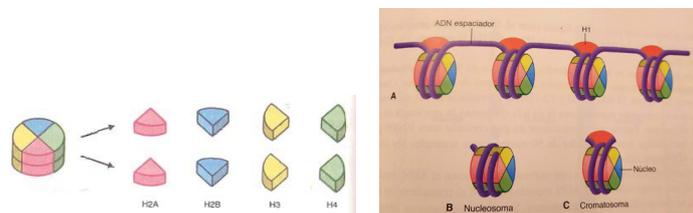


Fig. 4. A. Octámero de histonas formado por los cuatro pares de histonas que forman el núcleo del nucleosoma. B. Cromatina intacta de 10 nm, nucleosoma y cromatosoma. De De Robertis (2012)

El complejo formado por el nucleosoma más la histona H1 recibe el nombre de **cromatosoma** (De Robertis, 2004) y el segmento de ADN que se le asocia es de 166 pares de nucleótidos. El octámero de histonas forma un cilindro bajo de 10 nm de diámetro llamado “core o médula”, y se halla envuelto por un tramo de ADN llamado “**ligador**” que recorre el core casi dos veces. El ADN ligador posee 147 pares de nucleótidos. Las dos vueltas de ADN se fijan al core por medio de la histona H1. Los nucleosomas se hallan separados por tramos de **ADN espaciadores**, que contienen entre 20 y 60 pares de nucleótidos (Figura 5) (De Robertis, 2004; Pierce, 2010).

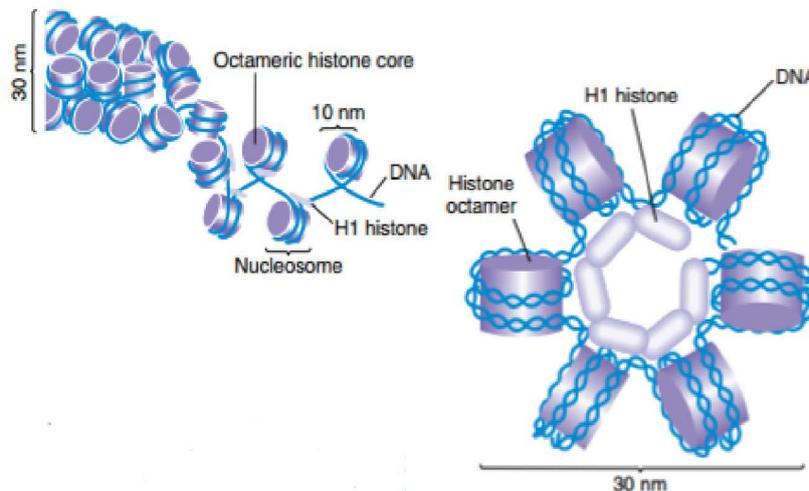


Fig. 5. Modelo de un solenoide de 30 nm mostrando octámero de histonas como discos púrpuras. Izquierda: vista lateral parcialmente desenrollada. Derecha:

agrupamiento de seis octámeros con la histona adicional H1 en el centro del círculo, actuando como estabilizador. De Griffiths et al. (2002)

Para que pueda ser contenida en el núcleo celular, la cromatina de cada cromosoma experimenta sucesivos enrollamientos, cada vez mayores, a medida que avanza el ciclo celular. En primer lugar, los cromatosomas se enrollan sobre si mismos y dan lugar a una estructura helicoidal llamada **solenoides**, de 30 nm de diámetro. Cada vuelta del solenoide contiene seis nucleosomas y las histonas H1 de éstos se unen entre sí. La cromatina se compacta aún más hasta constituir lo que se denomina **supersolenoides** (Figura 6).

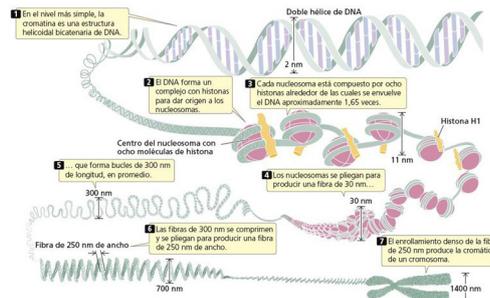


Fig. 6. Modelo de empaquetamiento de la cromatina desde DNA hasta un cromosoma. De Pierce (2015)

### A nivel químico – molecular

El cromosoma está constituido por ADN (15 a 20 %), ARN (10 a 15 %) y proteínas (65 a 75 %). El ADN se encuentra asociado principalmente a proteínas histónicas, siendo la relación ADN: histonas de 1:1. Su contenido en la célula es constante, tienen bajo peso molecular y son de naturaleza básicas por contener 10 a 20% de arginina y lisina. Las histonas son proteínas relativamente pequeñas cuyo tamaño oscila entre 11 y 15 kilodaltons (Kd), mientras que la histona H1 es de alrededor de 20 Kd.

Existen otras proteínas cromosómicas, las no histónicas (PNH) son proteínas diferentes de las histonas, tienen un alto contenido en aminoácidos básicos (25% o más), alto contenido en aminoácidos ácidos (20-30%), una elevada proporción de prolina (7%), bajo contenido en aminoácidos hidrofóbicos y una alta movilidad electroforética. Investigaciones llevadas a cabo por Laemmli y colaboradores en 1977 demostraron que las proteínas no histónicas formarían un **armazón proteico**. La evidencia existente hasta el momento sugiere que las fibras de solenoides (30 nm) formarían los lazos o dominios que emanan del armazón proteico y que este armazón estaría a su vez enrollado formando una espiral. Los dominios de ADN parecen estar unidos al armazón proteico por unas regiones específicas denominadas SARs (regiones de asociación específicas) (Lacadena, 1996) (Figura 7A, B).

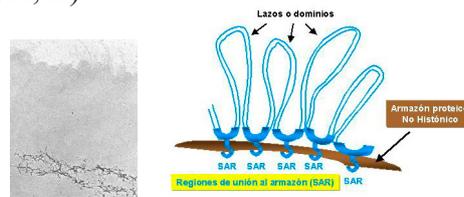


Fig. 7. A) armazón proteico no histónico. B) unión de los lazos de ADN al armazón a través de las regiones SAR. De Griffiths et al. (2002)

### Complemento cromosómico

El conjunto de los cromosomas de una célula o individuo constituye el *complemento cromosómico*. El estudio de sus características morfológicas externas (forma, tamaño y número) se realiza ordenando los pares de cromosomas homólogos en lo que se llama *cariotipo*. El cariotipo es característico de cada especie (Lacadena, 1996).

La representación gráfica de los cromosomas de una célula metafásica se llama *cariograma*. El *idiograma* es un cariograma en el que los cromosomas están ordenados de acuerdo a su forma y tamaño en forma descendente, pudiendo mostrar el patrón de bandas o no. En plantas, a diferencia de animales, es necesario realizar varios cariogramas debido a que la pared celular hace más difícil el acceso al núcleo (Figura 8) (Lacadena, 1996).

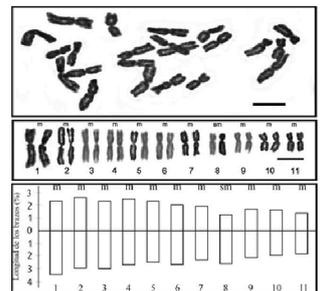


Fig. 8. A) Cromosomas en metafase de *Chaetanthera incana* ( $2n = 22$ ). B) Cariograma obtenido del análisis de 10 placas metafásicas. C) Idiograma del complemento haploide (los cromosomas se han ordenado de acuerdo a su tamaño decreciente). Las escalas corresponden a  $5 \mu\text{m}$ . De Baeza, Ruiz y Negritto (2008).

### Fase haploide y diploide

Todos los seres superiores se desarrollan a partir de un cigoto que se forma por la unión de dos gametos, uno procedente del padre (que contiene un genomio, y por lo tanto, un cromosoma homólogo de cada par) y otro de la madre (que contiene el otro genomio). Desde la formación del cigoto hasta la muerte, todo lo que sucede es un continuo proceso de división celular ecuacional; la única excepción la constituyen las células encargadas de formar las gametas. Los caracteres hereditarios (los genes) se transmiten únicamente, en la reproducción sexual, por medio de las gametas, que son el único punto de unión entre generaciones. En el proceso de meiosis que formará las gametas, en la anafase I, se separan los cromosomas homólogos el uno del otro; y a cada polo celular llegarán la mitad de los cromosomas (esto es, un genomio completo) y no las cromátidas simples de todos los cromosomas, como ocurre en la mitosis (Cubero Salmerón, 2013).

En el ciclo vital de los organismos con reproducción sexual se distinguen dos fases: la *fase diploide*, caracterizada porque las células contienen dos juegos idénticos de cromosomas, aportados normalmente cada uno por un gameto de cada padre, y *fase haploide*, en la que el número de cromosomas de las células es la mitad de la dotación (Lacadena, 1996) (Figura 9).

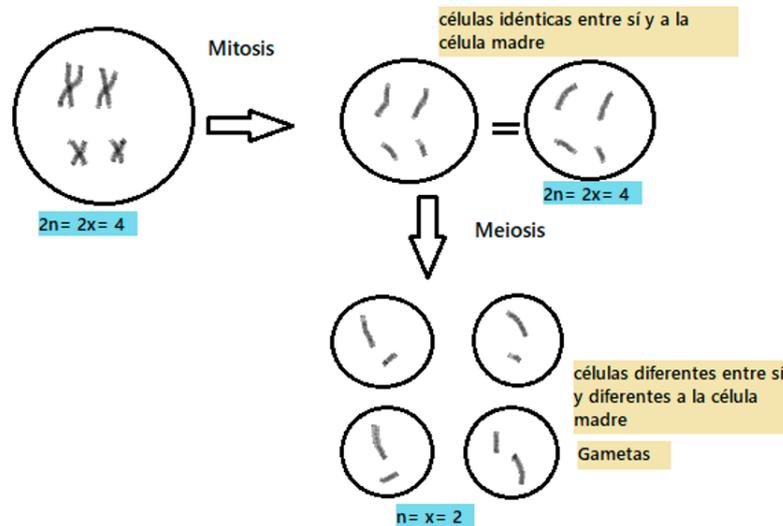


Fig. 9. Alternancia de fase diploide de células que se dividen por mitosis a fase haploide cuando las células forman gametas por meiosis. ( $2n$ ) número cromosómico somático, ( $n$ ) número cromosómico gamético, ( $x$ ) número básico.

### Cromosomas homólogos

Son los pares de cromosomas, que poseen, cada uno, la misma información genética para los mismos caracteres, es decir contienen los mismos locus o lugares donde se ubican los genes. La homología de los cromosomas asegura su apareamiento durante la profase de la división I de meiosis. Las gametas tienen un juego haploide de cromosomas, y cuando se fusionan las gametas masculina y femenina reestablecen la condición diploide. Así es que uno de los cromosomas del par homólogo proviene del padre y otro de la madre del individuo.

### Genomio y número básico

Se dice que un individuo es diploide cuando su dotación autosómica normal está compuesta por dos juegos idénticos de  $x$  cromosomas cada uno, de forma que dichos  $x$  cromosomas son todos diferentes entre sí ( $x_1 + x_2 + \dots + x_n = x$ ). Por ej. en el hombre ( $x_1 + x_2 + \dots + x_{23} = x$ ). Al conjunto de los  $x$  cromosomas se le llama *genomio* (o *genoma*), y *número básico* al de cromosomas que lo forman, o sea  $x$ ; estando cada uno de los diferentes cromosomas representado una sola vez; en un individuo diploide el número “ $x$ ” es igual al número “ $n$ ” (Lacadena, 1996).

Cuando la dotación cromosómica normal de un individuo está compuesta por más de dos genomios o juegos completos de cromosomas se dice que es un *poliploide*. Si los genomios que lo componen son iguales, el poliploide es un autopoliploide y se denomina *tri-*, *tetra-*, *....n-ploide* según que sus células somáticas normales tengan 3, 4, ...  $n$  juegos idénticos de cromosomas. Sus números cromosómicos serán, por lo tanto,  $3x$ ,  $4x$ , *....nx*, siendo  $x$  el número básico (Lacadena, 1996).

En resumen, cuando varias especies de un mismo género son poliploides y forman una serie donde los distintos números cromosómicos somáticos son múltiplos de un menor  $n^\circ$  haploide, este  $n^\circ$  constituye el *número básico* de la serie y se representa con  $x$ . Los distintos cromosomas no homólogos que se presentan en un poliploide se conocen como *set básico de cromosomas* (Cuadro 2).

**Cuadro 2: Número somático, gamético, básico y ploidía en especies de los géneros *Triticum* y *Nicotiana*.**

Espece	Nº somático (2n)	Nº gamético (n)	Nº básico (x)	Grado de ploidía
<i>Triticum monococum</i>	14	7	7	Diploide (2x)
<i>T. dicocum</i>	28	14	7	Tetraploide (4x)
<i>T. durum</i>	28	14	7	Tetraploide (4x)
<i>T. vulgare</i>	42	21	7	Hexaploide (6x)
<i>Nicotiana glauca</i>	24	12	12	Diploide (2x)
<i>N. sylvestri</i>	24	12	12	Diploide (2x)
<i>N. tabacum</i>	48	14	12	Tetraploide (4x)

### Terminología

**Genoma:** Material genético completo de una dotación cromosómica.

**Monoploide:** set básico de cromosomas.

**Número haploide:** número de cromosomas de las gametas, indicado por “n”. Este representa la mitad del número de cromosomas en las células somáticas, el cual se designa con “2n”.

**Especies diploides:** son las que tienen  $2n = 2x$  en sus células somáticas y,  $n = x$  en sus gametas.

**Especies tetraploides:** tienen cuatro sets básicos de cromosomas, o sea, células somáticas con  $2n = 4x$  y gametas con  $n = 2x$ .

**Monohaploide:**  $n = 1x$ .

**Dihaploide:**  $n = 2x$ .

**Serie poliploide:** En algunas plantas superiores, un patrón de ploidia surge cuando el número de cromosomas gamético (haploide) y somático (diploide) se incrementa en una progresión aritmética. El set de especies que muestra dicho patrón constituye una serie poliploide.

## **Bibliografía**

- Acquaah George (2012) Principles of Plants Genetics and Breeding. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons, Ltd.
- Baeza C., Ruiz E., Negritto M. A. (2008) El cariotipo de *Chaetanthera incana* poepp. ex Less. (Asteraceae). Gayana Bot. 65(2): 237-240. ISSN 0016-5301.
- Benito Jiménez C., Espino Nuño F.J. (2013) Genética. Conceptos esenciales. Madrid, España: Médica Panamericana.
- Cubero Salmerón, J. I. (2013) Introducción a la mejora genética vegetal. Mundi-Prensa Libros
- De Robertis E.M. (2004) Fundamentos de Biología celular y molecular. Ed. El Ateneo.
- De Robertis E.M, Hib J. (2012) Biología Celular y Molecular 16<sup>a</sup> ed. Buenos Aires: Hipocrático, 2012. 476 p.
- Freeman W.H., Lodish H., Berk A., Kaiser C., Scott M.P., Bretscher A., Ploegh H., Matsudaira P. (2005) Molecular Cell Biology. 5ta Ed. Panamericana.
- Griffiths A., Miller J., Suzuki D., Lewontin R., Gelbart W. (2002) Genética 7. <sup>a</sup> ed. Mc Graw-Hill.
- Klug W.S., Cummings M.R., Spencer, C.A. (2006) Conceptos de Genética, 8<sup>o</sup> ed. Madrid, España: Pearson Educación.
- Lacadena J. R. (1981) Genética. 3<sup>a</sup> ed. Editorial Complutense. Madrid, p. 1303.
- Pierce B. A. (2015) Genética: un enfoque conceptual, 5<sup>o</sup> ed. Madrid, España: Ed. Medica Panamericana.
- Srb A.M, R. D. Owen, R. S. Edgar. (1978) Genética General, 4<sup>o</sup> ed. Barcelona, España: Omega.
- Sinnott E. W., Dunn L. C.; Dobzhansky T. (1977) Principios de Genética. Barcelona, España: Omega.