



## Genética aplicada a la Biotecnología: Leyes de Mendel (2)

La herencia de los caracteres de padres a hijos es una evidencia que siempre llamó la atención de los investigadores, naturalistas y curiosos. Por ejemplo, era interesante notar que los hijos eran parecidos, pero no idénticos a sus padres. Pero no eran una mezcla exacta de ellos, sino que a veces eran más parecidos a un progenitor que al otro. Y que los hermanos de los mismos padres eran parecidos entre sí, aunque no idénticos. ¿Cómo se heredan los caracteres? Los trabajos de Mendel buscaron responder a esta pregunta y, aunque el propio Mendel no llegó a saberlo, sus trabajos sentaron las bases de la genética moderna en la que se basan muchas otras disciplinas, entre ellas la biotecnología moderna.

Los trabajos de Mendel con las plantas de arvejas comenzaron por investigar en la herencia de una característica a la vez. Para lograrlo, Mendel cruzaba dos líneas puras que diferían en un carácter y analizaba el fenotipo que producían la primera generación de descendientes (F1) denominados *monohíbridos* y luego la segunda generación (F2) obtenida a partir de la autofecundación de los monohíbridos. Luego Mendel comenzó a indagar con sus plantas de arvejas la herencia dihíbrida, es decir la de dos caracteres.

Plantas que difieren en dos caracteres. Los ensayos de Mendel

Para analizar la herencia de dos caracteres por vez, Mendel cruzó líneas de arvejas que eran puras para dos características a la vez. La descendencia F1 así obtenida se denomina "dihíbrida". Si se analiza el patrón de herencia de más de un carácter se deben realizar cruzamientos de líneas puras que difieran en esas dos (o más) características. Mendel eligió para estas experiencias plantas que diferían en el color y en la forma de la semilla. Comenzó con dos líneas parentales puras para cada carácter, es decir homocigota para cada carácter: una con semillas **amarillas y rugosas** (dominante para el color, recesiva para la forma) y la otra con semillas **verdes y lisas** (recesiva para el color y dominante para la forma). Si se simboliza este cruzamiento, el alelo que determina color amarillo se representa como **A** y al alelo que representa forma lisa como **L** (en consecuencia, el alelo recesivo del color verde se representa con 'a' y el recesivo de la forma rugosa con 'l'). Así, el genotipo de uno de los parentales será **AAII** y el del otro **aaLL**. El cruzamiento de estas dos líneas produjo semillas F1 todas iguales entre sí (uniformes), amarillas y lisas (ver Figura 1). El genotipo de los individuos F1 puede ser representado simbólicamente como **AaLl** y, como son **heterocigotas o híbridos para dos caracteres**, se los conoce como **dihíbridos**.

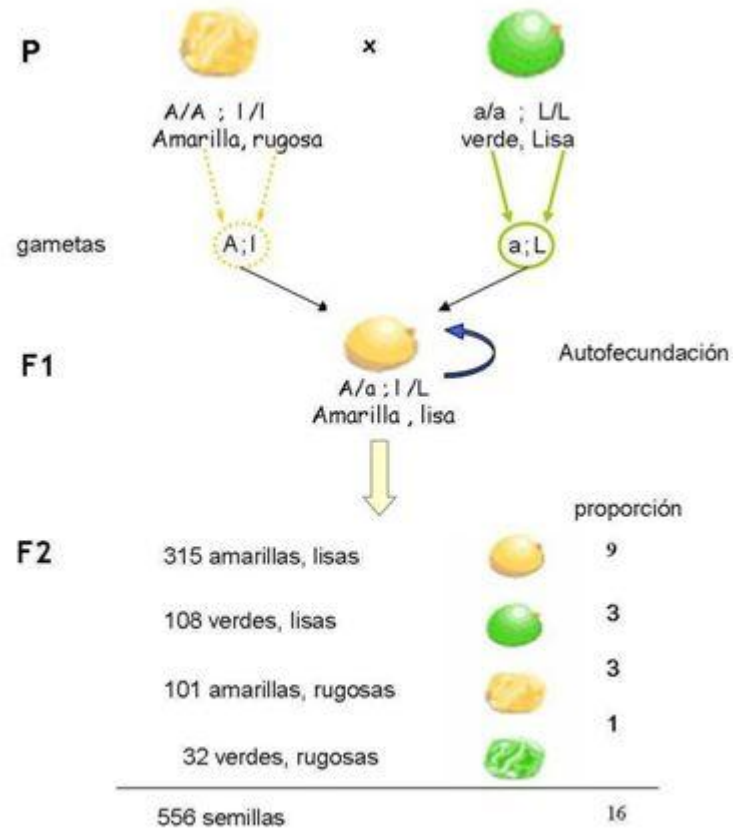


Figura 1: Proporciones fenotípicas observadas en la F1 dihíbrida y F2 obtenidas por cruzamientos de dos líneas homocigotas para dos caracteres (cruzamiento dihíbrido).

Esto da los primeros indicios de que la dominancia de la forma (lisas sobre rugosas) o la del color (amarilla sobre verde) no se ve afectada por el hecho de que el otro carácter se encuentre en heterocigosis.

El paso siguiente fue autofecundar los individuos F1 para obtener y poder analizar la F2. A este cruzamiento se lo conoce como **cruzamiento dihíbrido** (Figura 1). Al realizar esta experiencia, Mendel obtuvo un total de 556 semillas de cuatro variedades, en las siguientes relaciones numéricas y proporciones fenotípicas:



| Variedades        | Cantidad | Proporciones fenotípicas obtenidas | Conclusiones Proporciones fenotípicas            |
|-------------------|----------|------------------------------------|--|
| amarillas y lisas | 315      | 9,84                               | 9/16<br>ambos caracteres dominantes              |
| verdes lisas      | 108      | 3,38                               | 3/16<br>un carácter dominante y el otro recesivo |
| amarillas rugosas | 101      | 3,16                               | 3/16<br>un carácter recesivo y el otro dominante |
| verdes rugosas    | 32       | 1                                  | 1/16<br>ambos caracteres recesivos               |

Al repetir este tipo de ensayo varias veces para estas y otras combinaciones de caracteres, siempre obtuvo similares proporciones fenotípicas: 9:3:3:1.

Ante esta nueva proporción Mendel debía buscar una explicación, para lo cual previamente verificó que aún se siguiera cumpliendo la Ley de igual segregación de los alelos (ver Cuaderno 40) para cada uno de los caracteres por separado. Para ello agrupó a las plantas por un carácter (independientemente del otro) y observó:

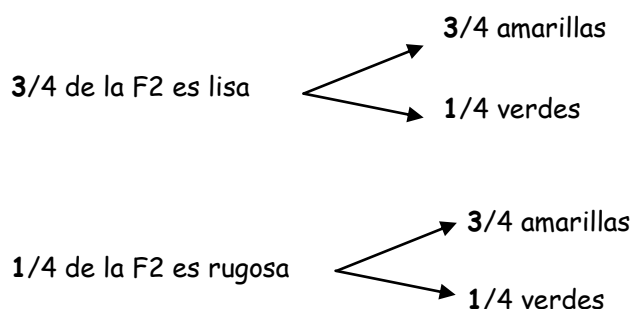
- color de la semilla: 416 amarillas (315 + 101) y 140 verdes (108 + 32), lo cual da una proporción 2,97 : 1.

- forma de la semilla: 423 lisas (315 + 108) y 133 rugosas (101 + 32), lo cual da una proporción de 3,18 : 1.

Es decir, la proporción fenotípica 3:1 de la segregación igual de los alelos se cumplía para cada carácter, independientemente del estado del otro carácter.

#### Proporciones Fenotípicas de la F2

Una forma de visualizar la combinación de estas dos proporciones fenotípicas 3:1 para cada carácter y entender así la proporción fenotípica 9:3:3:1 para ambos caracteres juntos, es realizar un "diagrama de árbol", como el siguiente:





Las proporciones fenotípicas de cada rama se multiplican para obtener la proporción fenotípica de los dos caracteres combinados de la F2 de 9:3:3:1, como se muestra a continuación:

$$\frac{3}{4} \text{ lisa} \times \frac{3}{4} \text{ amarillas} = \frac{9}{16} \text{ amarillas lisas}$$

$$\frac{3}{4} \text{ lisa} \times \frac{1}{4} \text{ verdes} = \frac{3}{16} \text{ verdes lisas}$$

$$\frac{1}{4} \text{ rugosa} \times \frac{3}{4} \text{ amarillas} = \frac{3}{16} \text{ amarillas rugosas}$$

$$\frac{1}{4} \text{ rugosa} \times \frac{1}{4} \text{ verdes} = \frac{1}{16} \text{ verdes rugosas}$$

Como la proporción fenotípica 9:3:3:1 puede ser obtenida por la multiplicación de las proporciones 3:1 de cada carácter, eso implica que los dos caracteres son independientes.

Mendel también realizó los cruzamientos de prueba entre los individuos dihíbridos de la F1 y un parental recesivo para los dos caracteres. Similarmente a lo que había obtenido con los cruzamientos pruebas de los monohíbridos en la descendencia, pudo observar los cuatro fenotipos en una proporción 1:1:1:1, lo cual, en vista de los conocimientos actuales de la genética, refleja la proporción gamética 1:1:1:1 de la F1 (1/4AL, 1/4Al, 1/4aL y 1/4al).

Ante la correspondencia entre los resultados obtenidos en sus ensayos y los resultados esperados acorde a las proporciones estadísticas, Mendel propuso que *el proceso por el cual las distintas `variantes' de un carácter se separan (segregan) a cada gameta es un proceso independiente al de la segregación de las `variantes' del otro carácter.*

En otras palabras, y con los conocimientos actuales de biología molecular, es posible enunciar la tercera ley de Mendel o la **Ley de la herencia o segregación independiente de los caracteres**: *durante la formación de los gametos (gametogénesis), la segregación de los dos alelos de un gen es independiente de la segregación de los alelos de otro gen.* Esta ley aplica sólo a genes que se encuentran en cromosomas distintos o a gran distancia el uno del otro dentro de un mismo cromosoma; es decir, a genes que no están *ligados* entre sí.

Formación de gametos y genotipo de la F2

Aplicando las leyes de Mendel de *Segregación igualitaria* y la de *Segregación independiente* al proceso de formación de las gametas, se obtiene que  $\frac{1}{2}$  de los gametos llevarán el alelo A (que determina color amarillo) y la otra mitad llevará el alelo `a' (para color verde). A su vez, la mitad de cada una de ellas llevará el alelo L (para semillas lisas) y la otra mitad el alelo `l' (semillas rugosas). Así, y dada la independencia de estos alelos, la probabilidad de obtener un gameto que lleve los alelos que determinan ambos caracteres, amarilla y lisa, es el producto de ambas probabilidades:  $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$  (Figura 2).

Lo mismo se aplica para los gametos que contengan los alelos que determinan las combinaciones de caracteres: amarilla y rugosa; verde y lisa; verde y rugosa. Así, como se obtiene  $\frac{1}{4}$  de cada una, se obtiene una proporción gamética 1:1:1:1 (Figura 2).

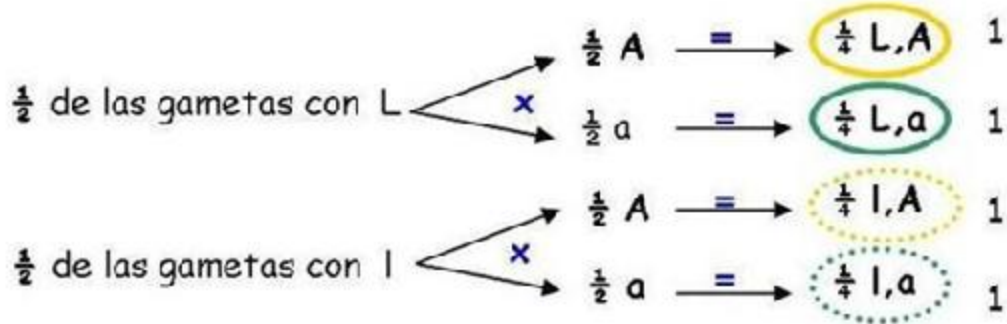


Figura 2: Formación de las gametas de la F1 dihíbrida que darán origen a la F2.

Al representar gráficamente el **crucamiento dihíbrido** (por autofecundación o interfecundación) se representan las cuatro posibles gametas que podrían generar los individuos F1 (Figura 3). En este caso es más práctico seguir el cruzamiento de las posibles gametas de un parental con los posibles gametas del otro parental por medio de un *cuadro de Punnet* (Figura 3), en el cual se representan los posibles genotipos de los hijos, según cuáles son las gametas intervinientes en el cruzamiento.

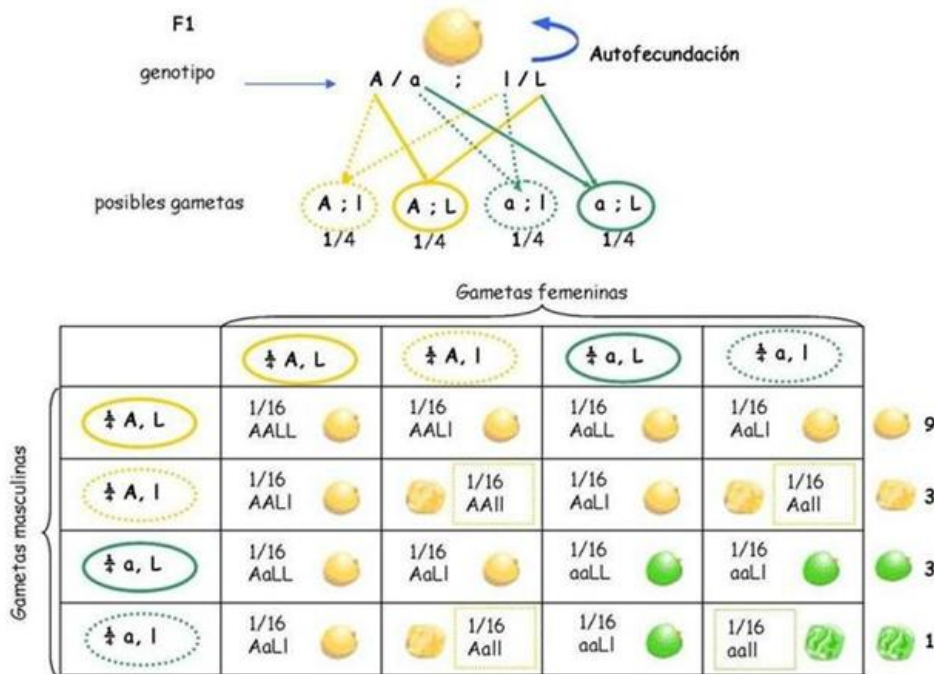


Figura 3: Formación de gametas y cuadro de Punnet con la constitución fenotípica y genotípica de la F2 de una cruce dihíbrida. Para claridad visual, sólo se representa un individuo F1 con sus gametas.

Dra. Estela Martín  
Química Legal  
Unidad VI  
2009

**Edición N° 41**



**El Cuaderno**  
de Porqué Biotecnología

### Trascendencia de las leyes de Mendel

Aunque Mendel enunció sus leyes en base al comportamiento de la planta de arvejas, *Pisum sativum*, estos mismos principios pueden ser aplicadas no sólo a las plantas y a la técnicas que emplea la agricultura, sino también a la genética animal y humana. La diferencia es la forma en que deben realizarse los ensayos, dado que algunas plantas y los animales (incluido el hombre) no pueden autofecundarse y es imposible conseguir otro individuo genéticamente igual para hacer una intercrusa (en el caso de algunos animales, pueden cruzarse hermanos obtenidos de una misma crusa entre dos parentales de líneas puras, similar a la intercrusa o autofecundación de F1). Por lo tanto es muy difícil conseguir líneas puras.

La importancia de la ley de Segregación Independiente es que permite determinar si dos genes son independientes o si están ligados entre sí (por estar cercanos en el cromosoma). Las aplicaciones de las Leyes de Mendel ha cambiado la historia de la agricultura. Los programas de mejoramiento convencional por cruzamientos para obtener nuevas variedades que lleven una característica de interés, pero no otra no deseada, también se han podido llevar a cabo aplicando la genética mendeliana. La aplicación de los principios de la genética mendeliana para la obtención de variedades híbridas mejoradas es lo que dio origen a la Revolución Verde de mediados del siglo XX. Este es también el principio en el que se basan los programas para la construcción de los mapas genéticos de las especies por medio de marcadores moleculares. Esto permite analizar varias características a la vez, y analizar de a pares los datos de la F2 para saber si se desvían de la Ley de Segregación Independiente, en cuyo caso se trataría de marcadores ligados entre sí. Consecuentemente, el uso de marcadores moleculares para asistir a los programas de mejoramiento convencional es otro ejemplo de aplicación de la genética mendeliana a la agrobiotecnología.

Por lo tanto, la biotecnología tradicional y la moderna aplicada fundamentalmente a la agricultura emplean las leyes de Mendel, así como sus cálculos matemáticos y estadísticos, no solo al planificar sus ensayos y analizar sus resultados, sino también para obtener nuevas y mejores variedades de alimentos, enriquecidos en características nutricionales y libres de otras características no deseadas.

**MATERIAL DE CONSULTA**

Dra. Estela Martín  
 Química Legal  
 Unidad VI  
 2009  
**Edición N° 41**



*El Cuaderno  
 de PorquéBiotecnología*

*Una tumba para los Romanov. Y otras historias con ADN.* Raúl Alzogaray. Colección Ciencia que ladra. Universidad de Quilmes. Siglo XXI editores. Argentina. 2004.

<http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/125/htm/genetica.htm>. Genética. La continuidad de la vida. Ana Barahona / Daniel Piñeiro. La Ciencia para todos. Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa. Fondo de Cultura Económica. México.

[http://web.educastur.princast.es/proyectos/biogeo\\_ov/4a\\_ESO/06\\_genetica/problemas.htm](http://web.educastur.princast.es/proyectos/biogeo_ov/4a_ESO/06_genetica/problemas.htm) Problemas de genética. Web de José Luis Sánchez Guillén. Profesor de Biología y Geología I.E.S. PANDO - OVIEDO (ESPAÑA)

<http://www.genetics.gsk.com/kids/heredity01.htm> En este sitio encontrarán juegos para armar hijos de marcianos con caracteres heredados de los padres (las instrucciones y el sitio están en inglés, pero luego de probar una vez el juego ya se entiende el mecanismo).

<http://www.biologia.arizona.edu/mendel/mendel.html> Ejercicios de Genética Mendeliana redactados por la Universidad de Arizona (EEUU) y traducidos por la Universidad de Formosa (Argentina).

[www.experimentar.gov.ar](http://www.experimentar.gov.ar). *Sitio de Ciencia Joven de la Secretaría para la Tecnología, la Ciencia y la Innovación Productiva (SeTCIP). Propone experimentos de Física, Química, Biología y Anatomía.*

<http://www.mendelweb.org> MendelWeb. Sitio con la historia y detalles de los ensayos de Mendel y un link para leer su trabajo original (en inglés).