

# Teoría y experimento en Genética Mendeliana: una exposición en imágenes<sup>1</sup>

*(Theory and experiment in Mendelian Genetics: a pictorial exposition)*

Mario CASANUEVA y Diego MÉNDEZ

Recibido: 9.02.2008

Versión final: 8.08.2008

BIBLID [0495-4548 (2008) 23: 63; pp. 285-306]

**RESUMEN:** En este artículo tratamos sobre los aspectos empíricos y conceptuales en la Genética Mendeliana y analizamos los vínculos entre ellos. Primero discutimos las ventajas de una representación gráfica de las teorías empíricas; luego pormenorizamos la estructura conceptual de la genética; en seguida, esquematizamos su protocolo experimental, a continuación destacamos los engarces entre ambas representaciones y, por último, proporcionamos una caracterización holista de la práctica genética, donde el representar y el intervenir se encuentran entremezclados.

**Descriptores:** experimento, Genética Mendeliana, grafo, modelo, pensamiento visual, representación.

**ABSTRACT:** *In this article we deal with the conceptual and empirical features of Mendelian Genetics, and analyze the links between them. First we discuss the advantages of portraying empirical theories as graphical representations. We then give a detailed account of the conceptual structure underlying Mendelian Genetics, followed by a schematization of the experimental protocol involved in this line of research. Links between both representations are highlighted. Finally, we provide a holistic characterization of Mendelian practice, where representing and intervening are intertwined.*

**Keywords:** *experiment, graph, Mendelian Genetics, model, representation, visual thinking.*

## *Individuos, células y moléculas en la genética del Siglo XX*

En términos generales, puede señalarse que la Biología del Siglo XX conoció tres grandes aproximaciones a la herencia. La primera de ellas, la Genética Mendeliana o Clásica, versa sobre la transmisión de las características individuales a lo largo de las generaciones. La segunda, la Teoría Cromosómica de la Herencia, sin desatender los fenómenos individuales, canalizó sus baterías al estudio de fenómenos celulares. El mapeo cromosómico, las aberraciones cromosómicas y las estructuras celular, tisular y sistémica en relación a determinados genes en cromosomas, son algunos de sus principales temas. La tercer genética se adentra en el micromundo molecular e involucra ácidos nucleicos (secuencias de nucleótidos) y proteínas (secuencias de aminoácidos). Entre ellas existe una cierta continuidad, aunque otorgando una importancia real a las variaciones reales, debemos mantenerlas diferenciadas. Aquí hablaremos de la primera.

La expresión “Genética Mendeliana”, como muchos de los nombres usados para referir teorías empíricas, no tiene referente unívoco ni límites claros. Para los fines de este trabajo se entiende “Genética Mendeliana” como un término que refiriere a una

---

<sup>1</sup> Este trabajo fue realizado con la ayuda del proyecto de investigación PICT Redes 2006 N° 2007 de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (Argentina).



clase de teorías, más que a una teoría individual. Tal clase incluye: las tesis de Mendel, las de los denominados “mendelianos” de principios del Siglo XX (1900-1915, aprox.) (Bateson, Punnett, Castle, de Vries de 1900, Correns, etc.) y las de las distintas variantes que en los libros de texto aparecen bajo el nombre “Genética Mendeliana” (Sinnot, Dunn & Dobzhansky 1961, caps. 3 y 6-9; y Luria 1977, pp. 137-142) (en adelante GM). Estas tesis son distintas, pero pueden considerarse como variantes de un mismo estereotipo, podría decirse que entre ellas puede reconocerse un cierto “aire de familia”. De este estereotipo hemos excluido:

- i. La Teoría Cromosómica de la Herencia (aunque a veces se le denomine Teoría Cromosómica de la Herencia Mendeliana) pues constituye un desarrollo teóricamente posterior y corresponde a otro desarrollo experimental, más asociado al mapeo genético que a la cruce entre variedades. Así, no hablaremos de cromosomas ni de *loci* dentro de ellos.
- ii. Todo lo que toca a los procesos de mutación (el uso contemporáneo del término fue introducido por Hermann Joseph Muller en el contexto de la Teoría Cromosómica de la Herencia y corresponde a ésta).
- iii. Los aspectos moleculares de los genes, tales como considerarlos una secuencia de nucleótidos, mismos que atañen a una Genética Molecular la cual no sólo presenta significativas reestructuraciones conceptuales sino que posee una base experimental por completo distinta (incluirlos aquí sería un inaceptable presentismo; si bien el estereotipo que aquí se presenta es casi ahistórico, algunos límites deben de ser respetados).

Hemos ilustrado los aspectos teóricos de GM con ejemplos que corresponden más bien al mendelismo de los libros de texto; sin embargo, la porción experimental es mucho más cercana a los experimentos realizados por el monje del monasterio de Santo Tomás. Si bien, puede considerarse que las tesis del abad son distintas de lo que hoy aparece en los libros de texto bajo el nombre de “mendeliano”, su desarrollo experimental es perfectamente subsumible bajo tales tesis<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Las principales diferencias entre los escritos de Mendel y lo que en los libros de texto se denomina “Genética Mendeliana” obedecen a la forma en que Mendel conceptuaba a sus “elementos”. En ocasiones, la notación del monje parece más bien corresponder a aspectos cualitativos que cuantitativos por lo que es difícil saber, a ciencia cierta, si éste poseía o no una concepción particularizada de sus “elementos”. Por ejemplo, actualmente y desde las primeras obras mendelianas de Bateson, un genotipo homocigoto dominante es denotado mediante una doble mayúscula *AA* y un homocigoto recesivo mediante una doble minúscula *aa*; Mendel empleó una sola letra (*A* y *a* respectivamente) para tales denotaciones. O. Meijer (1983, p. 150) y F.V. Monaghan & A. Corcos (1990, p. 280) han propuesto la idea de que Mendel, a diferencia de los desarrollos posteriores del mendelismo, concebía el material hereditario como conformado por fluidos o emulsiones miscibles o no. Para Mendel la propiedad más importante de los “elementos” estriba en que su naturaleza permite asegurar la estabilidad y segregación de los componentes parentales; el hecho de que sean o no elementos particulados es secundario. Es posible tener una concepción materialista, pero no particulada de los genes. La elucidación completa de este punto excede a los límites del presente artículo. Para mayor información a este respecto, confrontar Casanueva (2003, pp. 60-62 y 95-108).

### *Modelos y teorías*

En Filosofía de la Ciencia, la llamada corriente semanticista es una visión sobre las teorías empíricas centrada en la noción de modelo<sup>3</sup>. Bajo este enfoque, postular una teoría consiste, esencialmente, en postular una familia de modelos que se refieren a aquellas porciones del mundo de las que habla la teoría (por ejemplo, los modelos de dominancia estricta en los pares de alelos y sus correspondientes características estudiados por Mendel en *Pisum sativum* (chícharo, arveja o guisante), los procesos de interacción génica de la cresta de las gallinas, los distintos tipos de epistasis o de pleiotropía en numerosas especies, son modelos de GM; análogamente, el sistema Tierra-Luna, una canica en un plano inclinado, una bala disparada por un cañón, o un péndulo, son distintos modelos de la Mecánica Clásica de Partículas). Dentro de la Concepción Semántica los modelos se consideran estructuras conceptuales que pueden (re)presentarse de maneras muy diversas: (i) como estructuras topológicas de un determinado espacio de estados (Suppe 1989; van Fraassen 1970). (ii) mediante estructuras definidas por una oración o predicado formulado en el lenguaje de la teoría de conjuntos (Balzer et al. 1987) y (iii) como grafos de puntos y flechas, a la manera de la teoría de categorías (Casanueva 2005, pp. 29-53) etc. Ninguna de estas maneras posee un estatus privilegiado<sup>4</sup>. Sin embargo, para este trabajo hemos elegido la última forma, pues permite recuperar —literalmente de un solo vistazo— la estructura de los modelos.

Los modelos pueden conceptuarse como ensambles de entidades (sistemas o dominios) y relaciones —más específicamente mapeos, morfismos o funciones<sup>5</sup>— entre ellas. Si las entidades se representan por puntos o iconos y los morfismos por flechas, la estructura conceptual de los modelos puede representarse mediante cierto tipo de grafos o pictogramas<sup>6</sup>. En términos generales, nuestra propuesta pone de relieve el

<sup>3</sup> El término se utiliza en su sentido lógico-matemático. Dar un modelo es dar una interpretación de los términos de la teoría (i.e., dotarlos de un significado concreto) tal que los axiomas de la misma resulten verdaderos. Ya que esta noción es fundamentalmente semántica, el enfoque se ha denominado corriente semanticista, en oposición a la concepción clásica que, al considerar a las teorías como conjuntos de enunciados (más sus consecuencias lógicas), enfatiza los aspectos lingüístico-sintácticos de las mismas.

<sup>4</sup> Este aspecto ha sido señalado por van Fraassen (1989, p. 188), Suppe (1977, pp. 204-205; 1989, p. 82) y Giere (1988, p. 84). Incluso este último presenta su noción de modelos sin hacer referencia a ninguna estructura matemática sino simplemente como “representaciones mentales”.

<sup>5</sup> Una relación se define como un conjunto de pares ordenados, o en general de tuplas ordenadas (v.g., la relación “ser más alto que” es el conjunto de los pares ordenados  $\langle a, b \rangle$  donde  $a$  es más alto que  $b$ ). las funciones son un tipo particular de relaciones entre conjuntos en las que no hay dos pares ordenados diferentes con primer miembro idéntico o, en otras palabras, las funciones son relaciones unívocas por la derecha. Cuando las entidades involucradas no son conjuntos, sino entidades con una estructura interna (sistemas dinámicos, grafos, mapas, órdenes, etc.) no hablamos de funciones sino de mapeos o morfismos que también son relaciones unívocas por la derecha.

<sup>6</sup> Este enfoque permite distintos niveles de profundidad en el análisis y plasma, de manera formalmente precisa (o al menos tan precisa como se desee), la estructura conceptual del modelo o la teoría. Cada punto o flecha es susceptible de ser analizada más a fondo, desplegándola en subestructuras o grafos

papel epistemológico que cumplen las distintas partes del modelo como se muestra en la Figura 1a.

Un modelo ( $M$ ) es algo que se crea con determinados fines, entre otros, para responder preguntas. Éstas pueden ser representadas *de manera muy general* mediante: " $A \rightarrow Z$ ", donde la flecha indica la adscripción de la propiedad  $Z$  a los objetos que constituyen  $A$  o el paso de un cierto estado de cosas  $A$  a otro estado de cosas  $Z$ . " $A \rightarrow Z$ " abarca la interrogante sobre el fenómeno o tipo de fenómeno a explicar y, en este sentido, constituye la base de datos de  $M$ . Para dar cuenta de ella,  $M$  postula una serie de entidades (puntos  $C$  y  $D$ ) y relaciones (flechas) que constituyen una ruta alternativa, la cual igualmente engarza  $A$  con  $Z$ . Las dos rutas son puestas en relación de tal suerte que se conforma un circuito en el cuál radica la capacidad explicativa del modelo (Barwise y Seligman 1997, pp. 235-238; Ibarra y Morman 2000). Ambas rutas juegan, de alguna manera, el papel que Hempel asignaba a *explanans* y *explanandum*, correspondiendo a " $A \rightarrow Z$ " el último. Si las rutas se relacionan mediante la igualdad (esto es el valor de " $A \rightarrow Z$ " coincide exactamente con el de la composición " $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow Z$ "; *no se trata de que ambos resultados arriben al mismo codominio, sino de que tengan el mismo valor dentro éste*), estaremos en presencia de un circuito conmutativo. Pero pueden darse otros tipos de relación entre las rutas (v.g., inclusión ( $\subset$ ), desigualdad ( $<$ ,  $>$ ), diferencia ( $\neq$ ))<sup>7</sup>. Lo importante es que la relación entre las rutas nos permita inferir algo de una, a partir de la otra. El tipo de relación que se da entre ellas, caracteriza de alguna manera el grado de suficiencia empírica del modelo (la conmutatividad sería la mayor suficiencia, pues es la que otorga más información)<sup>8</sup>.

En la Figura 1a, la porción indicada como M-no teórica corresponde a los conceptos o subestructuras, previamente disponibles, que conforman la base de datos de la teoría contra la que se contrasta el modelo. Por su parte, la porción indicada M-teórica corresponde a conceptos o subestructuras, introducidos por el modelo y cuyo uso presupone la validez de las leyes propuestas por éste (y en consecuencia no deben ser usados para contrastarlo). Nótese que la distinción M-no teórico/M-teórico no se considera en abstracto, sino que está referida a un modelo  $M$  (confrontar esta distinción con la distinción T-teórico/no-T-teórico (Balzer et al., 1987, pp. 60 y ss)). La Fi-

---

completos e, inversamente, determinadas subestructuras de un grafo, se pueden colapsar en un punto o una flecha, según el caso.

<sup>7</sup> De entrada, es difícil pensar que la simple diferencia pueda dar alguna información relevante, máxime cuando lo importante de las relaciones entre rutas, es que pueda inferirse algo de una a partir de la otra. Pero visto con cuidado, el caso no es tan extraño: en geología, algunas veces no se sabe cuál es la procedencia de una determinada muestra pero sí se sabe que no es originaria de la zona de estudio (es alóctona) y ello proporciona información sobre la muestra y sobre la zona. Igualmente en arqueología se desconoce la procedencia de determinados objetos de una zona pero se sabe que son foráneos. Más aún este mismo tipo de razonamiento puede aplicarse a la detección de casos aberrantes en muestras estadísticas bajo análisis exploratorio de datos.

<sup>8</sup> La figura descompone el movimiento explicativo (" $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow Z$ ") en tres momentos: un primer momento (" $A \rightarrow C$ ") de introducción de los términos T-teóricos (formalización o teorización) un segundo momento (" $C \rightarrow D$ ") de cálculo inferencial y un último momento (" $D \rightarrow Z$ ") de interpretación o aplicación. El análisis de los mismos excede a los límites de este artículo.

gura 1b instancia, para el caso de GM, la visión general de la explicación suministrada por esta teoría.

*Genética Mendeliana: una estructura teórica en forma de grafo*

A continuación presentamos la estructura detallada de GM (Figura 2). Si bien la iconografía facilita un acercamiento intuitivo al significado de puntos o iconos y flechas, conviene señalar algunos aspectos, en cuanto al tipo de objetos que representan los primeros, y el tipo de relaciones que destacan las segundas. Aquí, los puntos o iconos corresponden a conjuntos de objetos y las flechas a funciones. En términos generales, las flechas representan reglas de inferencia (o un conjunto de ellas) que permiten obtener ciertos datos acerca del destino a partir de datos acerca del (o los) origen (orígenes). Cabe aclarar que:

- i. pueden existir flechas con dos o más orígenes (binarias, ternarias, etc.), pero no con dos o más destinos;
- ii. tanto origen (orígenes) como destino pueden ser puntos (o iconos) o flechas;
- iii. hay funciones que dependen de otras funciones y se representan por una flecha cuyo origen es otra flecha (o cuyos orígenes contienen al menos otra flecha);
- iv. las flechas onduladas representan *estructuraciones*, pueden vislumbrarse como un tipo particular de operaciones sobre las entidades-origen que permiten obtener múltiples arreglos de éstas (agrupaciones, secuencias, combinaciones, agrupaciones de agrupaciones, agrupaciones de secuencias, secuencias de secuencias, combinaciones de secuencias de agrupaciones, etc.) que forman “nuevas” entidades, a saber: las entidades-destino<sup>9</sup>.

La Figura 2 expresa en detalle las generalidades expuesta en la Figura 1b. La línea doble punteada separa, por abajo y por arriba, las porciones GM-no teórica y GM-teórica. El circuito que enlaza individuos, gametos y cigotos, en la parte inferior, representa la Teoría *Unigamética* de la Fecundación. Los individuos de la generación *t* producen gametos, la fecundación (*singamia*) “une” *un* gameto masculino y *un* gameto

---

<sup>9</sup> Desde un punto de vista puramente sintáctico, las estructuraciones pueden conceptuarse como definiciones, pues no son otra cosa que la aplicación de diversos operadores sobre las entidades origen y, en consecuencia, no añaden novedades ontológicas. En principio, son eliminables y no creativas. Pero desde otro punto de vista, más bien corresponden a postulados de existencia de las entidades-destino, pues no cualquier combinación de entidades susceptible de ser construida (definición) es aceptable por la teoría como algo que posee referente. Por ejemplo, los genotipos no son sino determinadas combinaciones de genes y constituyen uno de los dominios centrales de diversas genéticas. Pero las ternas conformadas por: individuos de ojos azules de la generación 8, individuos que poseen lóbulos separados de la generación 32, e individuos hermafroditas de las generaciones 452 y 5015 — aunque pueda construirse con los términos primitivos de algún modelo genético— son entidades absurdas que no aparecen en ninguna de sus leyes. Dicho sea de paso, el papel de la matemática y de la lógica es construir rutas inferenciales, definiendo nuevos puntos (estructuraciones) y nuevas flechas (reglas de inferencia).

femenino, y el resultado de ello es *un* cigoto de la generación  $t + 1$ , cuyo desarrollo resulta en *un* individuo de la generación  $t + 1$ .

Para plantear el problema de la genética, a saber: ¿cómo se transmiten las características a través de las generaciones? es necesario proporcionar una descripción de los individuos en términos de sus características heredables (mendelianas), por lo que se requiere introducir esta idea. A continuación, las características se agrupan por tipos. Una descripción está compuesta por una serie de características *una de cada tipo*, y se denomina fenotipo. Aquí consideramos al fenotipo como la serie de características que manifiesta el individuo a lo largo de su existencia. En el caso de los guisantes, “forma de semilla” y “altura de la planta adulta”, se incluyen en la misma descripción, aun cuando se refieren a distintos momentos de la vida del vegetal. Es por ello que la flecha marcada “descripción” tiene por origen a la flecha marcada “ontogénesis”<sup>10</sup>.

En la Figura 2, la porción GM-teórica postula la existencia de factores causales de las características. En esta parte se establecen las maneras de obtener los conceptos teóricos (genes, genotipos haploides y genotipos diploides) y las relaciones inferenciales entre ellos (lo que podríamos llamar el cálculo de GM). La obtención de los conceptos teóricos es como sigue: El concepto de alelo se introduce como un primitivo. Al igual que las características, los alelos se agrupan por tipos (causales) que se denominan genes. Por regla general, para cada gen se conocen varias formas alélicas, i.e., un alelo es una de las posibles formas de un gen. Un *genotipo haploide* contiene *un* alelo de cada de gen. Por su parte, un *genotipo diploide* está compuesto por un par de genotipos haploides. En adelante, salvo aclaración en contra utilizaremos el rótulo “genotipo” para referir al genotipo diploide, tal como es habitual en biología.

Las flechas “segregación” y “recombinación” son dos estructuraciones que conforman la parte medular del cálculo de GM. La primera indica, cómo obtener genotipos haploides a partir de los genotipos. El genotipo de un individuo puede dar lugar a tantos tipos de genotipos haploides como posibles recombinaciones de los alelos que lo conforman v.g., el genotipo individual:  $(\langle \square, 0, \oplus \rangle, \langle \square, 0, \uparrow \rangle)$  da lugar a cuatro genotipos haploides:  $\langle \square, 0, \oplus \rangle$ ,  $\langle \square, 0, \uparrow \rangle$ ,  $\langle \square, 0, \oplus \rangle$  y  $\langle \square, 0, \uparrow \rangle$ . Por su parte la flecha “recombinación” indica cómo formar genotipos individuales a partir de dos genotipos haploides (“unión” simple de cualesquiera dos de ellos). Durante la fecundación cada uno de los gametos aporta un genotipo haploide y su conjunción da lugar al genotipo del cigoto.

<sup>10</sup> El concepto “fenotipo” lo introdujo Johannsen en 1909; él estaba preocupado por la considerable variación en los tamaños de frijoles genéticamente idénticos (provenían de cepas puras) para escapar de esta variación introdujo el concepto de “fenotipo” como el valor promedio de las apariencias observadas. Esta definición estadística cayó en desuso y ha sido sustituida por la de “conjunto de las características presentes en un individuo” (Mayr 1982, p. 782). Desde el advenimiento de la Teoría Cromosómica de la Herencia y bajo un punto de vista celular, se considera que el fenotipo es una propiedad de cada célula que depende de la interacción dinámica genotipo-ambiente. Así puede considerarse que el fenotipo de los organismos deriva de la integración e interacción de los fenotipos de sus células. La versión de GM que presentamos aquí no incorpora estos aspectos; consideramos al fenotipo como una propiedad del individuo y hacemos abstracción del momento particular en que se expresan determinadas características (como se mencionó, desde Mendel hasta los libros de texto contemporáneos, características que no se presentan simultáneamente, se consideran conjuntamente en una sola expresión que describe el fenotipo de manera global, i.e., no temporalizada).

Las flechas denominadas “portación” relacionan estados de cosas en la porción GM-no teórica con la porción GM-teórica, vínculo necesario para la obtención de explicaciones. GM considera que cada gameto porta un genotipo haploide, en tanto que los cigotos y las distintas células somáticas portan genotipos. Los alelos segregan (se separan) en la gametogénesis y los gametos son haploides; pero en la fecundación, la unión de los gametos reestablece el número original de alelos y, así, los cigotos y (las células somáticas de) los individuos portan genotipos. Salvo una amplia variedad de procesos de mutación, se considera que el genotipo permanece invariante a lo largo del desarrollo ontogénico: desde el cigoto hasta la fase adulta, i.e., a todas las fases del desarrollo ontogénico (incluido el cigoto) les corresponde el mismo genotipo por lo que, en general, podemos identificar el genotipo de un organismo multicelular con el del cigoto que lo originó).

La flecha marcada “causalidad” establece una relación entre alelos y características. En los casos más sencillos, v.g., los chícharos de Mendel (proporciones 3:1, 9:3:3:1, etc.) se cumplen las siguientes propiedades: (i) cada alelo causa *una y sólo una* característica e, inversamente, cada característica heredable es causada por *su* alelo y (ii) el agrupamiento de los alelos se corresponde exactamente con el de las características (isomorfismo). En otros modelos (v.g., epistasis, pleiotropía o herencia multifactorial) los aspectos (i) y/o (ii) pueden modificarse. De cualquier manera, lo relevante es que se establece una relación causal de los alelos (o conjuntos de alelos de diferentes genes) hacia las características (o conjuntos de características).

La flecha marcada “comparación” (dominancia), la cual nos indica el comportamiento relativo de pares de alelos presentes en un genotipo: muestra cuál es el dominante y cuál el recesivo (por ejemplo, el gen que regula el color del albumen de la semilla del chícharo presenta un alelo dominante que determina para el color amarillo y otro recesivo que determina para el color verde)<sup>11</sup>. Así, la flecha “comparación” asocia a cada genotipo una secuencia de alelos que corresponde a aquellos que se expresan. Conviene aclarar que esta flecha no está presente en todos los modelos de GM, v.g., algunos casos de herencia multifactorial no contemplan una comparación sino un efecto aditivo de los genes.

La flecha marcada “determinación” indica que existe una manera de asociar genotipos a fenotipos; se trata de una función de funciones que, en los casos más sencillos, depende: del genotipo del individuo en cuestión, de una hipotética e idealizada asignación de causalidad entre genes y características, y del comportamiento relativo entre los pares de alelos presentes en el genotipo del individuo. Para encontrar el fenotipo, que corresponde a un genotipo dado, se comparan sus alelos gen por gen, si existe homocigosis (igualdad de alelos), se elige la característica producida por el alelo homocigoto si hay heterocigosis (presencia de alelos diferentes) se elige la característica que corresponde al alelo dominante.

---

<sup>11</sup> Desde un punto de vista contemporáneo, podríamos considerar que la dominancia resulta tanto de la función génica de los alelos como de sus interacciones. Depende de la interacción con el ambiente (incluso intracelular) y de las correlaciones del desarrollo. En aras de la sencillez, estas sutilezas no serían consideradas aquí.

### *La porción experimental del mendelismo*

Una teoría empírica pretende subordinar un conjunto de parcelas del mundo, pero para ello requiere construir una base de datos, la cual suministra la información que la teoría en cuestión va a explicar. Dado que es humanamente imposible considerar *todos* los datos de un sistema empírico, para la obtención de los datos por lo común se idealizan determinados rasgos previamente seleccionados (o estabilizados). Este proceso hace uso de regularidades conocidas y de otras teorías auxiliares, por ello la obtención de datos es un proceso de abstracción que, sin menoscabo a la honestidad, privilegia ciertos aspectos de los sistemas bajo estudio y discrimina otros. Implica también la manipulación física de los objetos, sea medirlos, etiquetarlos, almacenarlos, ubicarlos en ambientes controlados, etc. Más aún, para ello es menester la elaboración y ejecución de una ruta crítica, cuyo seguimiento resulte en la adquisición de los datos, y a la vez sirva de registro que permita rastrear los pasos en sentido inverso, es decir, en dirección al sistema original. Semejante registro es fundamental para la comunicación científica, pero también para anclar la teoría al mundo, pues, como veremos, parte del significado de los conceptos teóricos depende de esta conexión.

### *Grafo de la estructura experimental de la obtención de cepas puras*

A continuación se tratarán algunos de los aspectos experimentales más básicos del mendelismo. El objetivo de la experimentación no es representar, sino intervenir en (estabilizar a, en el sentido empleado por Ian Hacking) los fenómenos, este aspecto de la práctica científica, para fines del análisis filosófico, también puede ser modelado mediante diagramas de puntos o iconos y flechas. Siguiendo este tenor, el diagrama que se muestra a continuación recupera una faceta fundamental de la estructura experimental del mendelismo, misma que se remonta al trabajo original de Mendel, a saber, la obtención de cepas puras.

La Figura 3 ilustra los procedimientos seguidos reiteradamente para la obtención de un cepa pura de chícharos (no se muestran los procesos de obtención de híbridos). En ella aparecen los instrumentos materiales requeridos, así como ciertas condiciones naturales necesarias (por ejemplo, la alternancia del día y la noche); en la periferia destacan las acciones agrícolas que es menester realizar a lo largo del ciclo de vida de la planta (nuestra intención al incluir iconos que representan sujetos humanos es destacar el papel causal de los mismos y, resaltar la idea de trabajo en la práctica científica). El diagrama inicia en la parte inferior con la semilla aislada y, en el sentido de las manecillas del reloj, se suceden las distintas etapas de siembra y cuidado de la planta durante su desarrollo.

Nótese que algunos de estos insumos no son estrictamente de carácter material sino que incluyen un componente conceptual, v.g. el esquema de la flor (el reconocimiento de las estructuras florales es importante en el diseño experimental)<sup>12</sup>. Algunas de las técnicas presupuestas no poseen un patrón de aplicación determinado. Así el

---

<sup>12</sup> Nos interesa destacar que, en el proceso educativo formal, usualmente se aprende a reconocer tales estructuras en diagramas (donde son más claras) y posteriormente se identifican en flores reales.



icono que prohíbe la presencia de gorgojos y pulgones puede ser instanciado de múltiples maneras (mediante el crecimiento en espacios controlados tipo invernadero — como hizo Mendel— mediante la aplicación de pesticidas, mediante la eliminación manual de los insectos o la introducción de algún predador natural, etc)<sup>13</sup>. Mendel fue conciente de las posibles perturbaciones generadas por insectos, y tuvo especial cuidado en las labores de jardinería, como lo atestigua el siguiente pasaje:

Las plantas fueron cultivadas en cuadros de jardín —unas pocas lo fueron en macetas— y se las mantuvo en su natural posición, erguida, por medio de palos, ramitas y cuerdas tendidas. Para cada experimento, un número de plantas cultivadas en macetas fueron colocadas en un invernadero durante el periodo de floración. Debían servir de control para el experimento principal en el jardín contra posibles perturbaciones causadas por insectos. (Mendel 1866, p. 9)

El lado izquierdo de la figura refiere a un conocimiento práctico antecedente, propio de los horticultores, tanto que el lado derecho ilustra los aspectos metodológicos introducidos por Mendel. En este caso, el simple doblado de la quilla para evitar la fecundación externa (ver recuadro: aquí incluimos insumos y técnicas no usadas por los hortelanos, sino introducidas por el diseño experimental, como se verá más adelante). Aunque los aspectos representados en el lado izquierdo no son propios de GM, deben ser considerados si no se desea comprometer el éxito desde el principio.

El proceso representado en la Figura 3 debe iterarse hasta obtener plantas con una apariencia constante a lo largo de las generaciones o, para decirlo en los términos de Mendel, individuos que “permanecen constantes en su progenie” (Mendel 1866, p. 42).

Para dar cuenta de la obtención de híbridos, el recuadro de la Figura 3 (doblado de la quilla) debe ser sustituido por el diagrama de la Figura 4. En este último se incluyen los procesos de emasculación y polinización cruzada.

Más allá de lo representado en el esquema, en las consideraciones acerca de los asuntos experimentales conviene, además, estipular dos modalidades referentes a la construcción de la base de datos: una específica, en tanto procedimiento particular, con materiales concretos, para obtener datos a partir de un fenómeno determinado (misma que hemos ilustrado aquí); la otra indefinida, en tanto modo general del cual se desprende el tipo de datos o modelo de datos para el conjunto de sistemas empíricos que pretende subsumir la teoría. Ejemplos del primer caso son los experimentos de Mendel con plantas del género *Pisum* o los de Bateson con ratones (Bateson 1903). La ejemplificación del segundo caso, en el contexto de GM, pone de relieve prácticas y materiales genéricos para la obtención de cepas puras e híbridos, en atención a diversos organismos con reproducción sexual y fecundación unigamética. Pudiera pensarse que los procedimientos de trabajo experimental no son universales, sino que dependen de las operaciones posibles con cada organismo (por ejemplo, algunas plantas se pueden autofecundar, en tanto que las líneas puras de los mamíferos se obtienen por incesto (actualmente cabría la posibilidad de clonación)). Sin embargo cabe abstraer estas particularidades y plantear protocolos más generales que puedan ser instanciados de diversas maneras, así, en lugar de estipular cosas concretas como “chícharos”, “ma-

<sup>13</sup> En estricto sentido, la eliminación de insectos perturbadores no es necesaria, pero su presencia en gran número puede perturbar significativamente los resultados por lo que su control es recomendable.

cetas”, “tierra”, “pinzas”, “emasculación”, etc., se indicarían cuestiones más difusas como “organismos”, “nutrientes”, “espacios de confinamiento”, “acciones e instrumentos que garantizan la obtención de líneas puras”, etc. (nótese que la última serie de términos constituye una enunciación de clases generales que abarcan a las clases de la primera serie). Esto no significa otra cosa que la posibilidad de que los protocolos experimentales sean agrupados por familias, según el tipo de objetos a los que se desee aplicar la teoría, siguiendo, *mutatis mutandis* el mismo canon que sirve para agrupar a las aplicaciones intencionales de la teoría, a la manera de la Concepción Estructuralista de Teorías.

### *Grafo de los vínculos entre teoría y experimento en la Genética Mendeliana*

La Figura 5 yuxtapone fragmentos de las Figuras 2 y 3 y representa la unión entre las porciones GM-no teórica y experimental del mendelismo. La parte inferior del diagrama refiere parcialmente a la estructura de la porción GM-no teórica, es decir a la Fecundación Unigamética. La parte superior pone de relieve el diseño experimental para la obtención de cepas puras. Una serie de flechas engarzan ambos niveles, todas ellas están asociadas a momentos de la práctica experimental.

La flecha denominada “ontogénesis” en la Figura 2, aquí ha sido descompuesta en cinco flechas. En la Figura 2, la flecha “ontogénesis” asocia un cigoto con un individuo adulto; aquí esta asociación está mediada por una serie de pasos que transitan por: la semilla, dos estados iniciales de germinación, la plántula y la planta adulta. Hemos procedido de esta manera, ya que si bien conceptualmente a GM no le interesa el desarrollo, éste cobra una importancia fundamental en los procedimientos experimentales. La descomposición de la ontogénesis en estas cinco flechas no expresa sino un “refinamiento” de la flecha original, misma que se obtiene de la composición:  $\lambda \circ \varphi \circ \eta \circ \kappa \circ \phi$ . Como puede verse, las fases del ciclo de vida, en la parte inferior, se mapean a estados correspondientes en la parte experimental. Sin embargo, no se trata de un mapeo puntual. Por un lado, todo el proceso de fecundación y desarrollo original de la semilla, en la parte inferior, queda enmascarado en el tránsito de la flor a la vaina, en la parte superior. Los términos GM-teóricos no se muestran pues no participan del diseño experimental: un hortelano, sin ningún conocimiento de la genética puede repetir los experimentos de Mendel, siguiendo un protocolo. Algo que no podría hacerse excluyendo toda referencia a estructuras florales, granos de polen o semillas.

### *Integración del trabajo en la Genética Mendeliana*

El experimentador, en el desempeño de su actividad, conjunta representar e intervenir. Más aún, el diseño experimental mismo no tiene sentido para alguien que no está buscando contestar una pregunta y que, de alguna manera, prefigura una respuesta (por lo menos, conoce de antemano cierta clase de respuestas carentes de sentido). Por otra parte, podría pensarse que la actividad teórica ocurre por completo dentro de una esfera ajena a la práctica empírica, pero dicha actividad puede ser vista como una manipulación de símbolos y, en consecuencia, una intervención sobre un tipo particular de objetos (las ideas universales del tercer mundo popperiano).

La lectura del artículo original de Mendel sugiere que el agustino primero realizó sus cruza controladas y luego, al interpretar los resultados, vislumbró la existencia de elementos causales de la herencia (Olby 1979)<sup>14</sup>. Pero algunos intérpretes han señalado que es difícil creer que el diseño experimental descrito en ese trabajo fuese previo a la noción de factores hereditarios inobservables. En palabras de Jacob Bronowsky: “Nadie pudo haber concebido, esos experimentos a menos que tuviera claramente en mente la respuesta que iba a conseguir” (Bronowsky 1973, p. 386)<sup>15</sup>.

El trabajo experimental de Mendel privilegia determinadas estructuras morfológicas y para cada una de ellas produce dos cepas puras (correspondientes a las formas dominante y recesiva); identifica individuos de cada variedad complementaria y los cruza, de tal suerte que alterna la filiación de cepa del donador de polen y el donador del óvulo; obtiene híbridos y luego procura que estos se autofecunden; finalmente registra las proporciones de los caracteres en las generaciones sucesivas. La constancia de la apariencia de las cepas puras apunta hacia la pureza del “potencial expresivo” que contienen los gametos, la cruza de variedades que difieren en el aspecto de un carácter, así como la alternancia del donador masculino y femenino, según la variedad, apunta hacia una contribución hereditaria equitativa de ambos padres, independientemente de su sexo. Por otra parte, garantizar la autofecundación de híbridos y tener el cuidado de registrar —en tablas— las proporciones de la prole resultante y comparar estos resultados con el desarrollo de un binomio cuadrado, es una estrategia realmente inspirada: resulta difícil creer que este paso lo diese alguien que no estuviera vislumbrando *algo* sobre el comportamiento de factores hereditarios<sup>16</sup>. La Figura 6 integra la

<sup>14</sup> Olby señala que el abad ni siquiera llegó a tal conjetura, pero en lo últimos párrafos de “Versuche über Pflanzen-Hybriden” se habla de elementos portados por los gametos, la unión de dichos elementos en el cigoto y el efecto que tienen sobre la constitución del individuo. Baste el siguiente fragmento para ilustrar:

Según la opinión de famosos fisiologistas, la propagación en fanerógamas se inicia por la propagación de una célula germinal y una polínica, para formar una sola célula, que es capaz de desarrollarse en un organismo independiente, por la incorporación de materia y la formación de nuevas células. Este desarrollo procede en conformidad con una ley constante basada en la composición material y el orden de los *elementos* que logran una unión viable dentro de la célula. Cuando las células reproductoras son de la misma clase y semejantes a la célula primordial de la madre, el desarrollo del nuevo individuo se rige por la misma ley que es válida para la planta madre. Cuando una célula germinal logra combinarse con una célula polen desemejante, debemos suponer que ha tenido lugar un compromiso entre los *elementos* de las dos células que causan sus diferencias. (Mendel 1866, p. 43, cursivas añadidas)

<sup>15</sup> Para asentar el punto Bronowsky señala:

[...] Mendel eligió siete diferencias entre los guisantes [...] el guisante posee siete pares de cromosomas[; ...] no se puede experimentar con ocho caracteres distintos sin ubicar dos genes en un mismo cromosoma, los cuáles estarían ligados al menos parcialmente [...]. Si alguno de nosotros fuese nombrado abad de un monasterio, ciertamente que sería un elegido de Dios: pero no podría tener *aquella* suerte. [...] Mendel debió haber efectuado muchos experimentos y frecuentes observaciones antes de realizar su trabajo formal. (Bronowsky 1973, p. 386)

<sup>16</sup> Considérese, por ejemplo, que al hablar de la selección de plantas para el experimento Mendel señala que “No deben observarse marcadas perturbaciones en la fertilidad de los híbridos y de su descen-

estructura teórica del mendelismo y su quehacer experimental, conjunta e imbrica lo teórico, lo instrumental y lo práctico mientras refleja el quehacer científico como un todo.

A la luz de las explicaciones de las Figuras 2 a 5, queda claro que en la Figura 6 el trayecto rojo representa el protocolo experimental de Mendel, subdividido en tres circuitos que corren de izquierda a derecha y que representan, en ese orden, la práctica del hortelano, la del constructor de cepas puras y la del hibridista.

En el primer circuito, la actividad causal de los humanos se restringe a la siembra y cuidado de las plantas. La línea roja gruesa que inicia con las semillas en la vaina y se extiende hasta la planta adulta, representa el desarrollo ontogénico y corresponde a la composición de las flechas que desembocan en las diferentes fases de crecimiento de la Figura 4. Sobre este circuito se monta la actividad experimental genética.

En lo que toca al siguiente circuito, un productor de cepas puras no trabaja sólo con el desarrollo de las plantas, sino que más bien centra su actividad en la fase de los gametos. En este caso, al igual que en la Figura 3, se limita al doblado de la quilla para propiciar la autofecundación. La iteración de este proceso, aunado a la selección de plantas con un determinado carácter, da lugar a la obtención de cepas puras. Recordemos que la determinación de las características deriva de la producción de cepas puras, esto es, depende de la posibilidad experimental de generar líneas de descendencia que se distinguen entre sí respecto a una misma estructura anatómica (una característica es aquello que permanece constante en una línea de descendencia cerrada). Nuevamente la flecha roja gruesa que atraviesa los estados florales representa una composición de flechas. Los globos imaginativos, asociados al icono que representa al experimentador (del cual hemos destacado su capacidad de observación y manipulación sobre las estructuras florales), refieren a la identificación de estructuras florales y a una concepción de la fecundación unigamética. Nótese que la posición del cigoto obtenido, en el ovario, se corresponde con la posición de la semilla en la vaina (se destaca la formación del tubo polínico).

En el último circuito rojo, nuevamente la línea gruesa que atraviesa distintos estados florales corresponde a una composición de flechas. Es en este circuito donde radica el aspecto medular de la experimentación mendeliana: la emasculación y la fecundación controlada de distintas cepas puras, para la obtención de híbridos, se llevan a

dencia en las sucesivas generaciones". Lo que da a entender que ya hubo un trabajo previo. Igualmente al hablar del ordenamiento y secuencia de los experimentos, indica:

Quando se cruzan dos plantas, constantemente diferentes en uno o más aspectos, los caracteres comunes que poseen se transmiten, sin cambio alguno, a los híbridos y su progenie, según han demostrado numerosos experimentos. Pero un par de caracteres diferentes se unen en el híbrido para formar un nuevo carácter que, ordinariamente, esta sujeto a cambios en la progenie de híbridos.

El propósito de los experimentos era el de observar esos cambios por cada par de caracteres diferentes, y deducir la ley conforme a la cual aparecían en las sucesivas generaciones. Así, el estudio se convierte justamente en tantos experimentos, cuantos son los caracteres constantemente diferentes que se dan en las plantas seleccionadas. (Mendel 1866, p. 7)

Aquí nuevamente se nos da a entender que ya hubo un trabajo previo considerable.

cabo aquí. El icono que representa al experimentador destaca dos insumos materiales (un pincel y un frasco de granos de polen) y dos globos imaginativos, uno refiere a la identificación de estructuras florales, y el otro apunta al comportamiento relativo de características y a la pureza genética de los gametos. Es decir “prefigura” los términos teóricos de GM, por ejemplo, el que los genotipos de los gametos son haploides. La obtención de híbridos y su posterior autofecundación no tiene sentido si no se presupone la existencia de factores causales de las características. El experimento se realiza con la intención de indagar su comportamiento, aunque no tengamos una idea previa de cuál será.

Las flechas verdes, azules y negras guardan un significado semejante a las igualmente coloreadas saetas de la Figura 2. En azul se pone de realce que las semillas y las plantas portan genotipos y, por otra parte, que los óvulos y granos de polen de dichas plantas portan genotipos haploides<sup>17</sup>. En verde se asocian genes con los tipos de características que presentan las plantas experimentales, así como genotipos de individuos con fenotipos. En la parte superior derecha del esquema hay un obvio anacronismo: se muestra una persona frente a una computadora (ordenador); la finalidad es destacar el momento de cálculo teórico (flechas negras) de GM y poner el acento en que se trata de un cálculo (deductivo). El globo imaginativo corresponde al caso más sencillo de los experimentos tipo mendeliano, mediante una sucesión de segregaciones y recombinaciones, a partir de dos genotipos parentales puros (P) se obtienen los genotipos de la primera generación (híbrida) (F1) y de la segunda generación (descendiente de híbridos) (F2). En ambos casos existe un paso intermedio que refiere a obtención de los genotipos haploides de las células gaméticas. Los genotipos que incluyen alelos dominantes aparecen sombreados en amarillo.

La estructura de la explicación está dada por la obtención de circuitos que enlazan preguntas y respuestas. En este caso, “LA” pregunta genética puede ser fraseada en los siguientes términos: ¿por qué a partir de determinados padres se obtienen hijos con ciertas características? De hecho, esta pregunta se puede desglosar de muchas maneras; el diagrama destaca dos de ellas: ¿cuál será el fenotipo de los hijos en una línea de descendencia cerrada (autofecundación)?, ¿cuál será el fenotipo de los hijos de padres que provienen de cepas puras distintas (híbridos)? La primera se representa mediante la trayectoria que inicia con la estrella de cuatro puntos y siguiendo la indicación de las pequeñas flechas rojas de contorno negro, concluye con los fenotipos (el último paso incluye una acotación de cierre). La segunda, también concluye con los fenotipos pero inicia con la estrella de cinco puntos. La respuesta a ambas está dada por trayectorias que, atravesando por la porción GM-teórica, igualmente concluyen en los fenotipos. Para el primer caso, el ascenso hacia la porción teórica (flecha única) se inicia con la asignación de genotipos haploides homogéneos (idénticas para gametos masculinos y femeninos), puesto que se trata de una cepa pura. En el segundo caso, los genotipos haploides asociados a los gametos masculinos y femeninos no serán equivalentes (dos flechas). En todos los casos, a partir de los genotipos de los gametos se ob-

---

<sup>17</sup> El agustino no conoció el proceso de doble fecundación de las fanerógamas y en consecuencia consideraba a los granos de polen como gametos individuales.

tienen los genotipos de los individuos. De éstos, junto con el comportamiento relativo de los alelos y la asignación de causalidad entre genes y características, se obtienen los fenotipos correspondientes. Cabe señalar que en las cepas puras de recesivos es posible asignar directamente un genotipo a un fenotipo dado.

Ahora bien, la asignación de gametos a genotipos haploides no siempre es evidente, puesto que un genotipo puede dar lugar a varios genotipos haploides. En el caso de los homocigotos, los genotipos de los gametos son homogéneos, pero los híbridos dan lugar a distintos genotipos haploides. En este caso, saber cuáles fueron exactamente los que portaban los gametos que dieron origen a un cigoto dado es una cuestión de probabilidad. Y es aquí donde radica el carácter estadístico de GM<sup>18</sup>. Queda pendiente averiguar qué es lo que ocurre con el comportamiento de las sucesivas generaciones de híbridos. Aquí, el asunto a destacar es que mediante un buen programa de cruza controladas y un buen registro de datos, tarde o temprano se tendrá la suficiente evidencia para asignarle un genotipo al organismo bajo estudio.

La relación que los términos GM-teóricos guardan con el quehacer experimental es relativamente compleja: es menester considerar la hibridación y más importante aún, la obtención de la primera y segunda generación filial de híbridos, así como el registro de datos estadísticos y la interpretación de los patrones. Los términos “alelo”, “gen”, “genotipo diploide”, “genotipo haploide”, “segregación”, “recombinación”, etc. se inventan justamente para dar cuenta de tales resultados, y su existencia se postula a modo de la hipótesis más sencilla que lo consigue. Adquieren su significado en relación tanto a los objetos, y procesos representados en la Figura 6 como en relación a conceptos teóricos con los que se vinculan a través del formalismo (el programa reduccionista empirista radical —habitualmente atribuido a Bridgman— y conocido como operacionalismo consideraba que el significado de los términos teóricos podía reducirse al significado empírico o experimental. Este programa fue abandonado a mitad del siglo XX por inviable).

Lo anterior no es sino una presentación más de la tesis del holismo semántico de los términos M-teóricos. Cabe resaltar el siguiente asunto: la flecha que indica la asignación de causalidad puede ser obtenida mediante un proceso abductivo sobre el comportamiento señalado por las flechas rojas. Podría pensarse como una “convención” que consiste en asignar un alelo (para el caso más sencillo) o un grupo de alelos de distintos genes (para modelos más complicados) a todas las características emblemáticas de una cepa pura. De hecho, puede considerarse que todos los conceptos GM-teóricos se obtienen por abducción del comportamiento experimental. Ahora bien, aquí, a diferencia de lo que ocurre en la Mecánica Clásica de Partículas y otras teorías físicas, la postulación de entidades GM-teóricas —y no sólo de funciones GM-

<sup>18</sup> La asignación de probabilidades cambia según la información disponible. Supóngase que el alelo *A* es responsable de la característica **A** y el alelo *a* es el factor causal del carácter **a**; por otra parte, *A* domina sobre *a*. ¿Cómo saber si un individuo con apariencia **A** porta un genotipo *AA* o un genotipo *Aa*?. La respuesta mendeliana consiste en realizar una cruce con un individuo de fenotipo recesivo (y en consecuencia con genotipo conocido *aa*) y analizar las frecuencias fenotípicas de la descendencia. En el primer caso (*AA* X *aa*) todos los hijos serán híbridos (*Aa*) con apariencia **A** y en el segundo obtendremos ambos fenotipos (**A** y **a**) en iguales proporciones.

teóricas— obliga a que los métodos de determinación de funciones y/o identificación de entidades no se asocien con técnicas simples de determinación de magnitudes, sino más bien con toda una constelación de procesos que, en este caso, implican el seguimiento de varias generaciones de sujetos experimentales<sup>19</sup>.

A nuestro parecer, existe una diferencia interesante entre los aspectos teóricos y experimentales del mendelismo. En tanto que cualquier esquema teórico completo de GM debe hacer referencia a genes, características, genotipos, fenotipos, cigotos y gametos, un esquema de la estructura experimental podría no hacer ninguna referencia a chícharos, polen, macetas y autofecundación (si tal fuera el caso) sino, por ejemplo, a conejos, espermatozoides, jaulas y cópulas controladas. Podría decirse que, de alguna manera, la estructura experimental posee una plasticidad mayor que la estructura teórica.

Permítasenos establecer una analogía entre GM y la Mecánica Clásica de Partículas. Si quisiéramos averiguar el significado del término “masa” deberíamos señalar que “masa” es un concepto métrico y, en consecuencia, su extensión es una función que asigna números reales positivos a las partículas. También deberíamos señalar que ello ocurre de forma tal que se satisfacen tanto la segunda ley de Newton ( $m(p) \times d_t^2 s(p, t) = f(p, t)$ ), donde  $p$  significa partícula,  $m$  es la función masa,  $s$  es la función de posición —a cada partícula en cada instante le asigna una posición espacial—,  $f$  es la función de fuerza resultante y  $d_t^2 s(p, t)$  es la segunda derivada de la posición respecto al tiempo) al igual que algunas otras leyes especiales (v.g. ley gravitacional, ley de Hooke, etc.) según el caso. Pero aún así, no habremos determinado por completo el significado del término masa. Si “masa” es una función, su completa caracterización requiere estipular no sólo su dominio, codominio y algunas constricciones adicionales, además se requiere estipular cuál es exactamente la regla de asociación entre los elementos del dominio y el codominio. Esto último puede hacerse de muchas maneras: con balanzas, determinando trayectorias espaciales o impactos, etc. Ninguna manera en particular es necesaria, pero sí es menester al menos una. La carga teórica del término “masa” estipula que si efectivamente todos estos procedimientos determinan la masa de un objeto, dentro de los límites del error experimental, los valores obtenidos, mediante los distintos procedimientos, deben coincidir. Dicho en otras palabras, el significado del término “masa” incluye no sólo la caracterización dada por los aspectos teóricos sino que requiere además de una caracterización dada por los métodos empíricos.

Bridgman y el resto de los operacionalistas fallaron al señalar que el significado de un término estaba dado por la totalidad de operaciones empíricas asociadas al mismo. De ser así, habría tantos conceptos de longitud como formas de determinarla, con lo cual se perdería una de las propiedades más importantes de los conceptos científicos, a saber: su universalidad. Sin embargo, si bien es cierto que los métodos de determinación o aplicación de un concepto no proporcionan la parte medular del significado,

<sup>19</sup> Desarrollos posteriores de la genética si postularán un referente material de los términos gen y genotipo, pero eso escapa para los fines de este artículo.

también es cierto que son necesarios para determinar la totalidad del significado. Si no contásemos con absolutamente ningún método para la determinación del término “masa” (ya sea directo, como es el caso, o indirecto, como podría ser el caso), simple y sencillamente toda la Mecánica Clásica de Partículas carecería de sentido<sup>20</sup>.

En GM, para determinar el significado de la expresión “genotipo de un individuo”, no sólo es menester considerar que éste está formado por un par de genotipos haploides con los que se relaciona según las reglas de segregación y recombinación mendelianas, o que es algo portado por cigotos e individuos, etc. Para averiguar el significado completo la expresión “genotipo de un individuo” es menester apelar a los procedimientos empíricos que nos permiten diferenciar genotipos (uso de cepas puras, cruza controladas, análisis de frecuencia de la descendencia, etc.). Si se trata de un vegetal, la fecundación controlada se realizará de manera diferente a la que se llevaría a cabo en un animal. No obstante, entre ambos diseños experimentales existen vínculos que deben respetarse. De esta manera, granos de polen y espermatozoides son análogos entre sí, y de igual manera son análogos óvulos y “células huevo” (para emplear la terminología de Mendel), también en ambos casos se entiende que, *mutatis mutandis*, en principio, una característica mendeliana es algo que permanece en determinadas líneas de descendencia, etc.

En resumen: la determinación cabal del significado de los términos T-teóricos en las teorías empíricas requiere apelar, no sólo a sus caracterizaciones y constricciones teóricas, sino también a los procedimientos empíricos que subyacen a los métodos de determinación de las asociaciones dadas por las flechas.

### Conclusiones

Una cepa pura es un objeto que podría darse naturalmente (como sucede en poblaciones geográficamente aisladas), pero las cepas puras con las que trabajó Mendel fueron construidas por él, y no hubiesen existido sin su intervención. Y, si como hemos visto, las cepas puras son necesarias para determinar el significado completo de los términos GM-teóricos, el representar requiere del intervenir.

Por otra parte, Mendel era perfectamente consciente que para lograr un cepa pura requería garantizar la auto fecundación iterativa de una línea de descendencia, y para ello, basándose en sus ideas acerca de la fecundación en fanerógamas, simplemente dobló la quilla de las flores de la planta elegida, pues sus teorías acerca de la fecundación “garantizaban” que de esta manera las células huevo de la flor sólo estarían en contacto con los granos de polen de la propia flor. Por otra parte, para la generación de híbridos, Mendel emasculó a las flores, colocó sobre los estigmas granos de polen provenientes de otra planta, y a continuación dobló la quilla. Todo esto presupone la identificación de las estructuras florales como órganos sexuales de las plantas, y una determinada teoría de la fecundación, a saber: la teoría de la Fecundación Unigaméti-

---

<sup>20</sup> Cabe señalar que hay términos teóricos que no tienen procedimientos de determinación (al menos no métodos propios, como el uso de balanzas para determinar la masa), por ejemplo “entropía”. Lo relevante es que, dentro de la teoría al menos algún término teórico (TT) tenga tales métodos; otros términos pueden adquirir su significado de manera indirecta por la relación que guardan con TT.



ca. Pero estas presuposiciones —si bien descansan en una teoría— no son GM-teóricas. Sin embargo, como se mostró en el diagrama 6 el diseño experimental de alguna manera supone una prefiguración de entidades teóricas. Así, el intervenir requiere del representar.

### *Epílogo*

En nuestra opinión la racionalidad científica incluye tres aspectos o fases que son dignas de consideración, a saber: 1) una racionalidad que podríamos calificar de epistémica o inferencial, propia de los aspectos conceptuales; 2) una racionalidad técnica o procedimental, propia de los aspectos de laboratorio e instrumentales; y 3) una racionalidad fronética o prudencial en la que caben aspectos práctico-sociales. Tradicionalmente, los aspectos epistémicos ha sido objeto de estudio de la filosofía de la ciencia, la revolución kuhniana enfatizó los terceros, y Hacking los segundos. Sin embargo, estos últimos han sido los más descuidados por la filosofía contemporánea. Nuestra idea con el presente trabajo es contribuir a subsanar dicho hueco.

### REFERENCIAS

- Balzer, W., C.U. Moulines y J. Sneed (1987). *An Architectonic for Science. The Structuralist Program*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
- Barwise, J., y J. Seligman (1997). *Information flow. The Logic of Distributed Systems*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bateson, W. (1903). “The present state of knowledge of colour-heredity in mice and rats”, *Proc. Zool. Soc.* II, pp. 71-99.
- Bronowsky, J. (1973). *The Ascent of Man*. Boston-Toronto: Little, Brown and Co. [Existe traducción castellana. México: Fondo Educativo Interamericano, 1979.]
- Casanueva, M. (2003). *Mendeliana*. México: Miguel Ángel Porrúa-UAM-I.
- (2005). “Los Modelos en la Filosofía de la Ciencia del Siglo XX”, en A. López Austin (comp.), *El modelo en la ciencia y la cultura*. México: Siglo XXI, pp. 29-53.
- y D. Méndez (2005). “Tres teorías y tres niveles en la genética del siglo XX”, en A. Estany (ed.), *Ciencias matemáticas, naturales y sociales*. Madrid: Ed. Trotta (Enciclopedia Iberoamericana de Filosofía), pp. 197-224.
- Giere R. (1988). *Explaining Science: A Cognitive Approach*. Chicago: University of Chicago Press.
- Hacking, I. (1983). *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ibarra, A., y T. Mormann (2000). “Una teoría combinatoria de las representaciones científicas”, *Crítica* 32, pp. 3-46.
- Lawvere, W., y S. Schanuel (1997). *Conceptual Mathematics: A First Introduction to Categories*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Luria, S. (1980). *36 lecciones de Biología*. Barcelona: H. Blume.
- Mayr, E. (1982). *The Growth of Biological Thought*. Cambridge (Ma.): Belknap Press.
- Meijer, O. (1983). “The Essence of Mendel’s Discovery”, en V. Orel y A. Matalová (eds.), *Gregor Mendel and the Foundation of Genetics*. Brno: Mendelianum of the Moravian Museum, pp. 123-172.
- Mendel, G. (1866). “Versuche über Pflanzenhybriden”, *Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn, Bd. für das Jahr 1865*, Abhandlungen, pp. 3-47. [Facsímil electrónico: <http://www.esp.org/foundations/genetics/classical/gm-65.pdf>. Las citas corresponden a la traducción castellana publicada en Stern y Sherwood (eds.) (1973).]
- Monaghan, F.V., y A.F. Corcos (1990). “The Real Objective of Mendel’s Paper”, *Biology and Philosophy* 5, pp. 267-292.

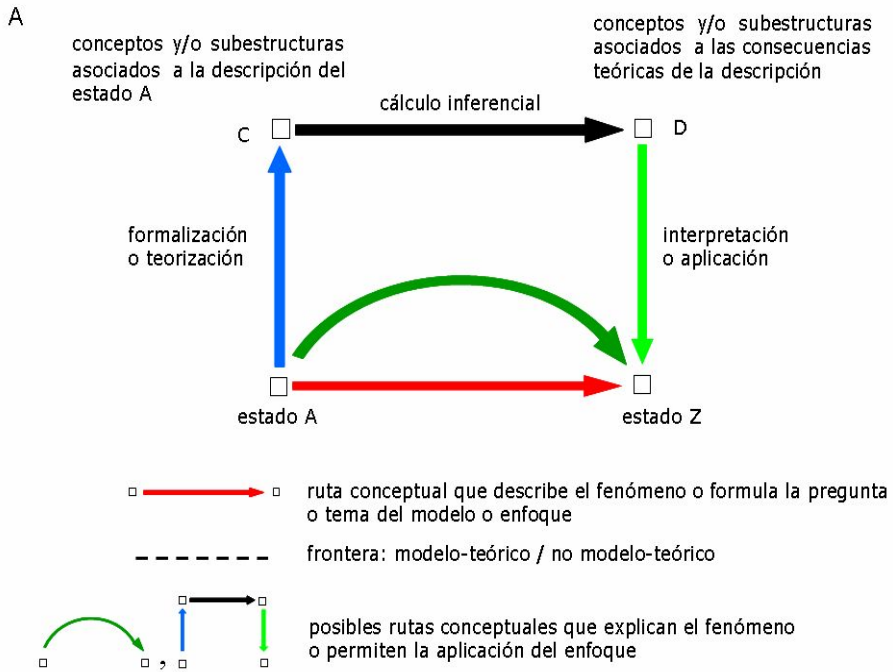
- Olby, R.C. (1979). "Mendel no mendelian?", *History of Science* 17, pp. 52-66.
- Orel, V., y A. Matalová (eds.)(1983). *Gregor Mendel and the Foundation of Genetics*. Brno: Mendelianum of the Moravian Museum.
- Sinnot, E.W., L.C. Dunn y T. Dobzhansky (1961). *Principios de Genética*. Traducción de A Prevosti. Barcelona: Omega.
- Stern, C., y E.R. Sherwood (eds.)(1973). *El origen de la genética*. Madrid: Alhambra.
- Suppe, F. (1977). "The Search for Philosophic Understanding of Scientific Theories", en F. Suppe (ed.), *The Structure of Scientific Theories*. Urbana: University of Illinois Press, pp. 1-244.
- (1989). *The Semantic Conception of Theories and Scientific Realism*. Urbana: University of Illinois Press.
- Van Fraassen, B. (1989). *Laws and Symmetry*. Oxford: Oxford University Press.
- (1970). "On the Extension of Beth's Semantics of Physical Theories", *Philosophy of Science* 37 (3), pp. 325-339.

**Mario CASANUEVA LÓPEZ.** Biólogo Experimental por la UAM-Iztapalapa. Doctor en Filosofía de la Ciencia por la Universitat Autònoma de Barcelona. Ha sido Coordinador General del Posgrado en Humanidades y Jefe del Área de Lógica y Filosofía de la Ciencia en la Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa. Es coeditor (con León Olivé) de *La Ciencia y sus métodos*. Es especialista en historia y filosofía de las teorías genéticas. Su libro, *Mendeliana*, incluye la reconstrucción de tres redes teóricas con más de cuarenta especializaciones. Actualmente es Jefe del Departamento de Humanidades de la UAM-Cuajimalpa.

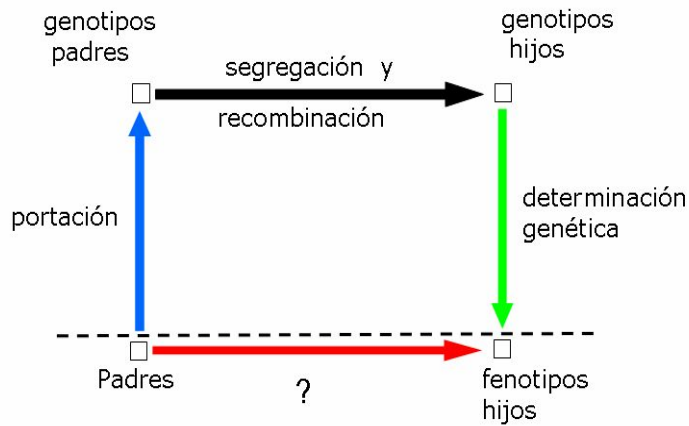
**DIRECCIÓN:** Universidad Autónoma Metropolitana, Campus Cuajimalpa. División de Ciencias Sociales y Humanidades, Departamento de Humanidades. Pedro Antonio de los Santos No. 84, Esquina con Gobernador Tornel, colonia: San Miguel Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, C.P. 11850, México, D.F. E-mail: mario.casanueva@gmail.com.

**Diego MÉNDEZ GRANADOS.** Biólogo de formación, con doctorado en Humanidades por parte de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa (UAM-I, México). Trabaja cuestiones relativas a la representación y el cambio conceptual en las ciencias de la vida. Es autor de varios artículos en libros y revistas. Fue profesor visitante del Departamento de Humanidades de la UAM-Cuajimalpa (México), entre 2005 y 2007. Actualmente ocupa el cargo de profesor titular, en el Departamento de Ciencias de la Comunicación de la misma universidad.

**DIRECCIÓN:** Universidad Autónoma Metropolitana, Campus Cuajimalpa. División de Ciencias Sociales y Humanidades, Departamento de Ciencias de la Comunicación. Av. Constituyentes 1054, colonia: Lomas Altas, Delegación Miguel Hidalgo, C.P. 11950, México, D.F. E-mail: mendezgranados@gmail.com.



**B**



**Figura 1a y 1b: Estructura de la explicación**

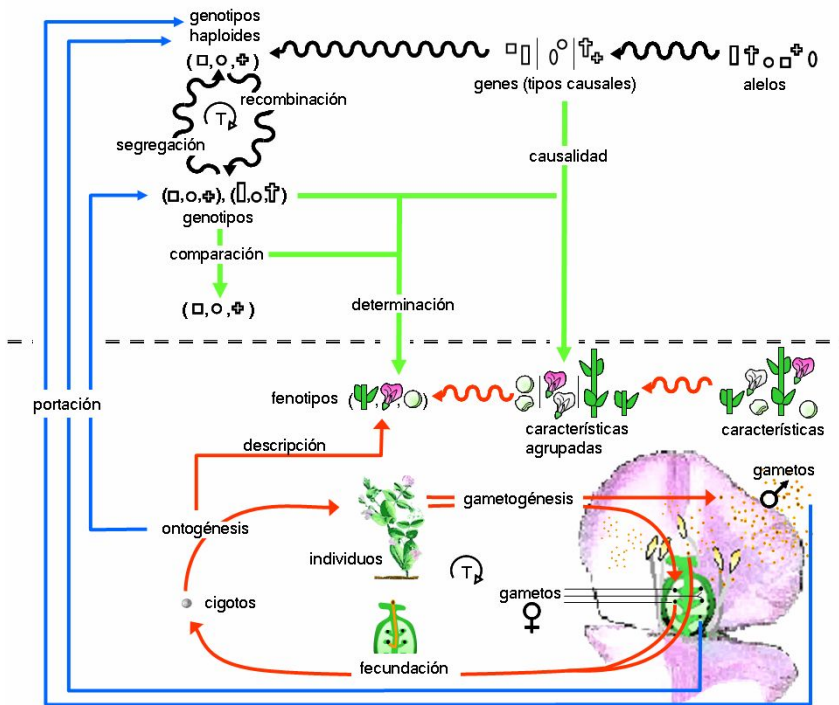


Figura 2: Grafo conceptual de la Genética Mendeliana

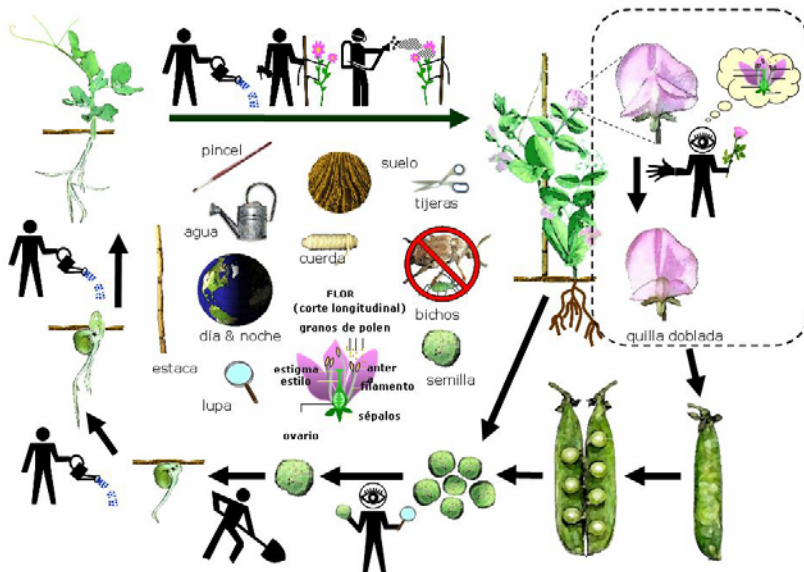
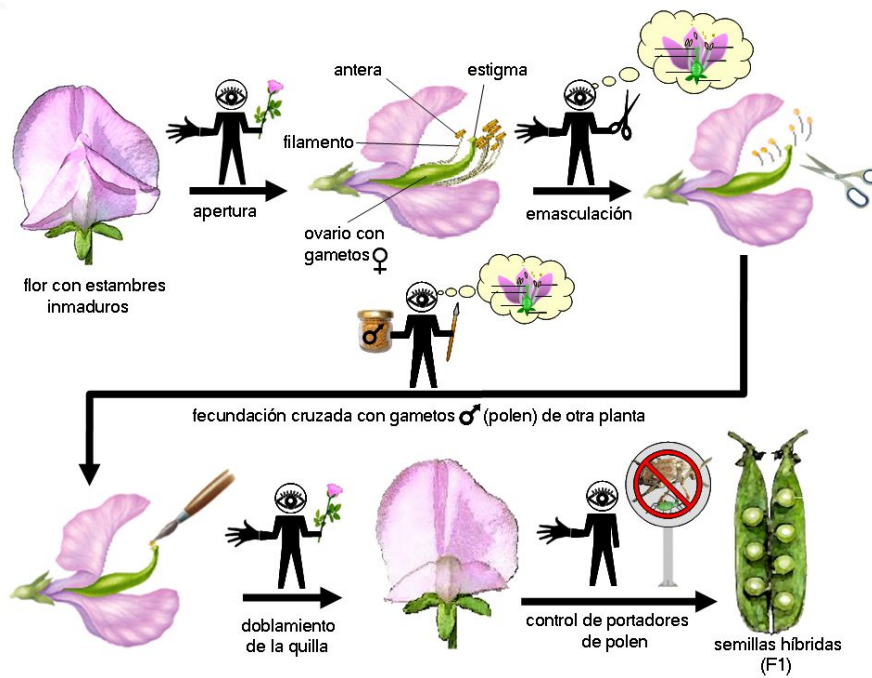
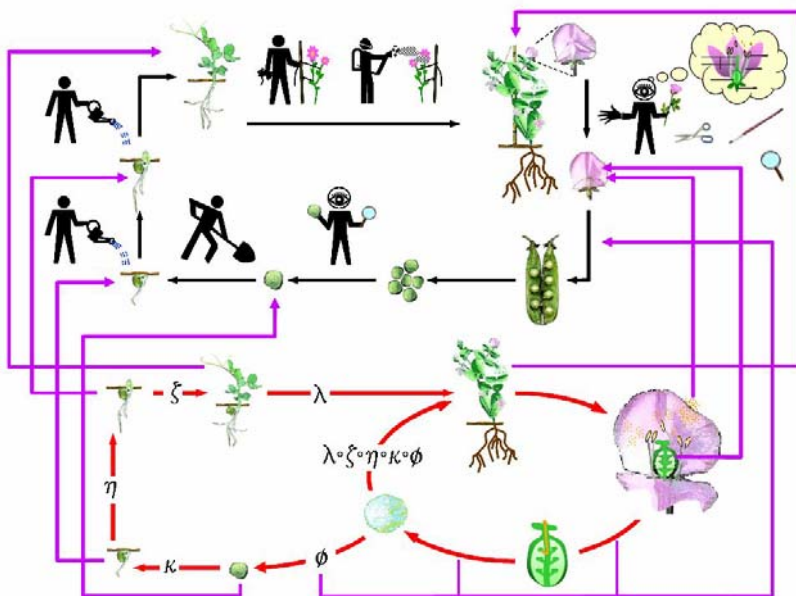


Figura 3: Diseño experimental para la obtención de cepas puras



**Figura 4: Diseño experimental para la obtención de híbridos**



**Figura 5: Vínculos entre teoría y experimento en la Genética Mendeliana**

