

# FORMACIÓN DE MODELOS MENTALES EN LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE GENÉTICA

SIGÜENZA MOLINA, AGUSTÍN FRANCISCO  
IES León Felipe (Benavente). Av. Zamora 2, 1º B. 47100 Tordesillas. Valladolid  
E-mail: asiguel@enebro.pntic.mec.es

---

## SUMMARY

From the perspective of the so-called «Psychology of Information Processing» we analyse the building of mental models through the resolution of problems in the field of classical genetics. This analysis is focused on the representation of the knowledge and the problems, as well as on the inference process, used by students while trying to find a solution. The methodology used in the research, of a causal-explanatory type, has finally rendered hypotheses on the general principles controlling the formation of mental representations and their redescription to develop more consistent and flexible models.

---

## INTRODUCCIÓN

Conocer cómo las personas representamos internamente las situaciones problemáticas a las que nos enfrentamos y cómo afrontamos su resolución, resulta esencial tanto para saber lo que es la cognición como para la elaboración de estrategias de enseñanza que faciliten el aprendizaje. Por ello, al enseñar los diferentes contenidos de las ciencias y en particular la resolución de determinados tipos de problemas, cabe preguntarse cuáles son y cómo son las representaciones mentales que el alumno construye en cada una de las situaciones que se le plantean. Las respuestas nos permitirán entender cómo cambian esas formas de pensamiento y cómo el trabajo del profesor puede facilitar ese cambio, aproximándolas a aquéllas científicamente correctas.

A lo largo de las tres últimas décadas, los psicólogos cognitivos han planteado varias formas de representación del conocimiento, llegando a controversias sobre la

existencia o no de formas de representación diferentes de las cadenas de símbolos. Entre éstas, han merecido especial atención los *esquemas mentales* (Norman, 1983), denominando así a las representaciones mentales duraderas de un tipo de conocimiento genérico (declarativo, procedimental...) adquirido a través de la experiencia pasada con objetos, situaciones, eventos, conceptos, etc. Así mismo, en el campo de la psicolingüística han destacado: las representaciones proposicionales, los modelos mentales –analogías estructurales de situaciones del mundo real o imaginario construidas por el individuo al abordar una situación o un problema– y las imágenes mentales –perspectivas particulares de un determinado modelo mental– (Johnson-Laird, 1985).

En particular, los modelos mentales han sido objeto de estudio desde hace más de treinta años. Minsky, en 1968 (p. 426) ya afirmaba que «para un observador B, un

objeto (o situación) A\* es un modelo de un objeto (o situación) A en la medida en que puede utilizar A\* para responder cuestiones de interés para él con relación a A». Para Johnson-Laird, el punto central del razonamiento y de la comprensión de cualquier fenómeno, evento, situación o proceso del mundo está en la existencia de un modelo de trabajo en la mente de quien razona y comprende. Pensar, entonces, implica la construcción de un modelo mental «intermediario entre el mundo y el individuo, interno, autónomo, coherente y funcional» (Rodríguez y Moreira, 1999). Estos modelos permiten a los individuos hacer inferencias y predicciones, entender los fenómenos, decidir las acciones a tomar y controlar su ejecución. A diferencia de las representaciones duraderas como los esquemas, los modelos mentales son constructos psicológicos que se concretan con los datos que en un momento preciso percibe el individuo; además, el contenido informativo del modelo mental depende de la intención del sujeto acerca del objeto, evento o situación a la que se enfrenta (Johnson-Laird, 1990).

En este estudio se analiza la relación entre las representaciones mentales duraderas –esquemas mentales previos– y los modelos mentales que el alumno construye para resolver determinados tipos de problemas (analogías mentales del problema), a partir de los cuales elabora o reconstruye nuevas representaciones duraderas más consistentes –esquemas revisados–. Consideramos diferentes ambos conceptos, ya que los esquemas pueden permanecer en la memoria desprovistos de detalles concretos –por ejemplo, el esquema de coche–, pero cuando pensamos en un coche (cuando construimos un modelo mental *ad hoc*), lo hacemos, según nuestra intención, en uno determinado (por ejemplo un coche de fórmula 1), infiriendo detalles como el color, la forma o el número de asientos. Del mismo modo, cuando resolvemos problemas en un dominio concreto de las ciencias, como es la genética, empleamos esquemas causales (esquemas mentales donde existen relaciones causa-efecto), que concretamos en un modelo mental cuya interpretación se realiza en base a las demandas de la situación problema a la que nos enfrentamos.

## FINALIDAD Y CARACTERÍSTICAS METODOLÓGICAS DEL ESTUDIO

El estudio aborda la construcción de modelos mentales, empleando determinados esquemas causales, durante la resolución de problemas de lápiz y papel en el dominio de la genética clásica. El empleo de problemas tiene como función situar al alumno en un contexto de aprendizaje que le permita desarrollar y construir determinados modelos mentales. En este contexto, el interés se centra en responder a las siguientes cuestiones: ¿Qué heurísticos emplean los alumnos en la construcción de estos modelos? ¿Qué papel juegan los esquemas mentales en este proceso? ¿La construcción de los modelos influye en la elaboración de esquemas causales más consistentes? Las respuestas pueden ayudarnos a resol-

ver un importante problema didáctico: ¿cómo podemos intervenir en la construcción y ejecución de estos modelos para mejorarlos y aumentar con ello la calidad del aprendizaje?

## ¿Por qué se aborda la resolución de problemas de genética?

En el campo de la biología, la genética constituye uno de los bloques más difíciles de comprender, tanto por la complejidad de sus contenidos (mayoritariamente abstractos) como por las dificultades que caracterizan sus estrategias de enseñanza, en particular a las actividades de resolución de problemas (Smith, 1988). Aprender a partir de los problemas en la enseñanza de la herencia biológica no es tarea fácil. Algunas de las causas responsables de ello residen en los estudiantes y otras, en las características de los problemas y en su forma de resolución.

Ayuso, Banet y Abellán (1996) citan las siguientes dificultades:

- 1) Dificultades de tipo conceptual, en las que incluyen la incapacidad de algunos sujetos para encontrar el significado o interpretar las palabras-concepto o los procesos que intervienen en el problema. De este modo, su percepción ante una misma situación será distinta de la de sus profesores (Smith y Good, 1984) o de la de otros compañeros.
- 2) Dificultades relacionadas con el nivel de desarrollo cognitivo (Walker, Hendrix y Mertens, 1980).
- 3) Dificultades relacionadas con el enfoque de los problemas y las estrategias de resolución. Los planteamientos causa-efecto, que proporcionan el genotipo de los progenitores y el modelo de herencia a seguir para averiguar el fenotipo de la descendencia, no suelen requerir un análisis detallado de los datos iniciales, resolviéndose generalmente mediante la aplicación de algoritmos. Por el contrario, los problemas efecto-cause, en los que se parte de fenotipos conocidos, requieren del estudiante establecer el modelo de herencia (causa o conjunto de causas) y determinar los genotipos de los individuos haciendo uso de determinadas reglas. Esto, para algunos autores (Stewart, 1983, 1988; Johnson y Stewart, 1990; Stewart y Hafner, 1991) podría contribuir a mejorar la construcción y aplicación del conocimiento propio de este dominio.
- 4) Finalmente, los estudiantes podrían tener dificultades de tipo operatorio, como una noción errónea de la probabilidad y, por tanto, de las proporciones fenotípicas y genotípicas (Browning y Lehman, 1988).

Todo ello nos lleva a considerar los problemas de genética como un aspecto relevante en las dificultades del aprendizaje de la biología, de forma que cualquier intento de clarificación de los procesos mentales que los estudiantes desarrollan a la hora de resolver estos problemas y de las causas que impiden su éxito puede

resultar de gran ayuda para el profesor que imparte esta asignatura, al tiempo que puede contribuir a un mejor conocimiento del pensamiento del alumno.

### Metodología

Dadas las características de la investigación en la que las variables independientes constitutivamente no son manipulables, se ha optado por un diseño de orientación empírico-analítica y una metodología no experimental «ex-post-facto» (Kerlinger, 1985, p. 268) de tipo explicativo-causal. La variable independiente, la construcción del modelo mental en este caso, no puede ser manipulada directamente sino que se seleccionan tareas que deben desencadenar, a través de dicho proceso constructivo, variaciones en las diferentes explicaciones, interpretaciones y predicciones que el alumno realiza –variable dependiente.

El método elegido es de tipo descriptivo. La descripción sistemática del comportamiento del alumno observado durante la resolución de los problemas y de la forma en que él mismo expresa verbalmente su pensamiento permite analizar la estructura del proceso cognitivo y explorar las características que lo definen. Las observaciones se llevaron a cabo durante las tareas de resolución de problemas con 6 alumnos (3 chicos y 3 chicas) de primero de bachillerato (LOGSE). La muestra se seleccionó en un grupo de 24, excluyendo previamente los sujetos con rendimientos académicos un 25% por encima y por debajo de la media. Además fueron entrevistados utilizando la técnica *teachback* (Gutiérrez y Ogborn, 1992), basada en la teoría conversacional de Gordon Pask (1975), para obtener datos de niveles más profundos que los que proporcionan los sujetos entrevistados en un primer nivel de explicitación. En esta entrevista se desarrolla un diálogo con el alumno, precedido por una frase cuyo significado ha de ser «enséñame» (*teach me*). Con suerte, esto evoca una serie de asociaciones libres sobre la manera en que el entrevistado resuelve los problemas. Pero, poco a poco, el campo se estrecha consiguiendo elicitar parte del pensamiento implícito del sujeto.

Se asume que las tareas planteadas a los alumnos implican la construcción y manipulación de diferentes modelos mentales. Según el modelo descrito por De Kleer y Brown (1983), este proceso se lleva a cabo secuencialmente de la forma siguiente:

- 1) El sujeto construye una representación interna de la estructura del sistema. En este caso, dicha estructura se basa en: objetos (individualidades portadoras de genes, combinaciones posibles de alelos o genotipos y características fenotípicas), estados del modelo (tipos de combinaciones de alelos y cruzamientos posibles) y procesos (segregación, transmisión independiente y cruzamiento).
- 2) En base a la estructura se desarrolla un proceso de inferencia que opera sobre el conocimiento del sujeto. El resultado es un modelo mental ejecutable.

3) El sujeto realiza una simulación mental del funcionamiento del modelo (*running* del modelo ejecutable).

4) El sujeto compara los resultados obtenidos ejecutando el modelo, con la realidad.

Cada una de estas fases conlleva complejos procesos cuyo análisis requiere consideraciones específicamente relacionadas con la tarea que el alumno debe realizar y el contenido que debe aprender.

La obtención de datos para el análisis se llevó a cabo de forma similar en todos los casos, mediante grabación de las conversaciones entre el entrevistador y el alumno al tiempo que resolvía las tareas que se le presentaban (entrevistas *teachback*) y análisis del material escrito originado durante la resolución de los problemas en el aula.

## DESARROLLO DEL ESTUDIO Y RESULTADOS

### Construcción del modelo genético de Mendel

#### *Tipos de problemas*

Cinco semanas del curso se dedicaron a temas de genética mendeliana clásica, centrandolo la estrategia de enseñanza en la resolución de problemas. Después de estudiar los conceptos de *dominancia simple*, *codominancia* y *meiosis*, los alumnos objeto de estudio resolvieron 9 tipos de problemas de genética mendeliana (46 problemas), a través de los cuales deberían ir desarrollando el modelo genético de Mendel con todas sus variaciones. Se emplearon problemas de libros de texto que requieren que los alumnos razonen en la dirección causa  $\rightarrow$  efecto y problemas que requieren que los alumnos razonen en la dirección efecto  $\rightarrow$  causa.

#### *Estrategia didáctica*

Los alumnos trabajaban en grupos de tres y su tarea consistía en resolver el problema con un determinado esquema cuya validez deberían demostrar ante otro grupo.

En primer lugar se presentó el esquema de dominancia simple (Causa 0 o  $C_0$ ) haciendo hincapié en los objetos, estados y procesos que intervienen en él, para que actuara de premodelo. Seguidamente el profesor planteaba el proceso de meiosis y su relación con el mecanismo de determinación del sexo ( $C_1$ ). El esquema de meiosis empleado era bastante simple y no consideraba genes ligados al sexo ni ligados a autosomas. Pero, junto con el de dominancia simple, proporcionaba la base para plantear la revisión del modelo empleado en la resolución de los problemas. A continuación se les planteaban problemas de codominancia ( $C_2$ ) donde los datos no encajaban con el esquema de dominancia simple (hay tres fenotipos en lugar de dos;  $C_0 + C_1$  insuficientes). Los alumnos

emplean el esquema de dominancia simple para reconocer anomalías y lo revisan para acomodar los nuevos datos. Concluido esto se planteaba el caso del alelismo múltiple (más de dos alelos para una característica, C<sub>3</sub>); la interacción génica (más de un gen responsables de la expresión de una sola característica, C<sub>4</sub>); pleiotropía (un gen influye en más de una característica, C<sub>5</sub>); ligamiento al sexo (gen situado en un cromosoma X, C<sub>6</sub>); y ligamiento autosómico (dos genes situados en el mismo cromosoma no sexual, C<sub>7</sub>).

De los 46 problemas realizados, en 29 de éstos generaban un esquema causal «genético» revisado (esquema mental nuevo). En 15 problemas, los esquemas generados eran aceptables desde el punto de vista científico, pero los otros incluían errores que invalidaban el modelo empleado: tenían errores en la asignación de fenotipos, de asignación de ratios a los fenotipos resultantes en un cruzamiento o presentaban inconsistencias en la relación genotipo-fenotipo (Tabla I).

**Secuencia de análisis**

Aunque desde el punto de vista didáctico el esquema mental empleado por el alumno es importante, no menos importante es el modelo mental que se pone en juego durante la resolución de los problemas; es

decir, las representación interna que el individuo hace de los mismos en el momento de su resolución. Para su estudio, se ha desarrollado la siguiente secuencia de análisis.

*Análisis de las representaciones internas duraderas*

Debemos diferenciar la representación del conocimiento de la representación que el alumno hace del problema; es decir, lo que el alumno sabe (esquemas o representaciones indirectas, representaciones directas, redes semánticas...) y sabe hacer (sistemas de producción) de lo que supone representar una situación en la que se encuentra la tarea en la que hace uso de lo que sabe y sabe hacer (modelo mental ejecutable).

**Representación del conocimiento**

En este tipo de conocimiento intervienen objetos, estados del modelo y procesos. Para todos ellos, el sujeto lleva a cabo una representación indirecta, ya que los esquemas mentales empleados se mueven en el plano de lo abstracto. Podríamos decir que utiliza un formalismo de representación en el que la relación entre la representación y lo representado no es un homomorfismo, sino una relación de denotación entre un significante (la representación) y su significado (aquello a lo que la representación se refiere).

Tabla I

Tipos de problemas resueltos tras modificar un esquema mental previo.

Tipo de problema	Núm. de problemas	Con modelo final revisado	Científicamente aceptable	Fallos en la asignación de objetos	Fallos en la asignación de estados	Fallos en la asignación de procesos	Porcentaje de cruzamientos probados que se ajustan al modelo final
M1	7	6	5				100
M2	7	5	4				100
M3	7	5	2				94
G1	3	3	2				87
G2	4	3	1				94
S1	7	3	0				85
S2	2	2	0				100
P1	3	1	1				100
A1	6	1	0				95
Total	46	29	15				

Nota: M1, M2 y M3 son problemas con una característica, con tres alelos o alelos múltiples y seis, cinco y cuatro variaciones de la característica, respectivamente. G1 y G2 son problemas con una característica, una interacción génica entre dos loci y dos y cuatro variaciones de la característica respectivamente. S1 y S2 son problemas con una característica, ligamiento al sexo y patrones de dominancia simple y codominancia respectivamente. P1 presenta problemas con dos características y pleiotropía. Finalmente, A1 corresponde a problemas con dos características, ligamiento autosómico y dominancia simple en ambos loci.

Las siguientes frases extraídas de las transcripciones del pensamiento en voz alta de los alumnos reflejan el conocimiento declarativo sobre el que se apoyarán sus modelos mentales, al tiempo que resumen los postulados básicos de la genética mendeliana:

«Las características que se heredan están determinadas por unas partículas llamadas genes.» (J.M., 16 años)

«Los genes se transmiten de los padres a los hijos por medio de los gametos.» (C.G., 17 años)

«Un ser posee, al menos, un par de genes para cada característica en cada una de sus células, exceptuando los gametos.» (M.G., 17 años)

«A veces, un gen de un par (alélico) tapa a otro gen y no se aprecia la característica que éste determina.» (dominancia) (J.M., 16 años)

«Durante la formación de los gametos, los genes que están juntos formando pareja, se separan y cada gameto recibe uno sólo de cada pareja.» (Segregación independiente) (O.R., 17 años)

«La probabilidad de que un gameto reciba un gen de un par o de otro par es la misma.» (N. P., 17 años)

«Cuando se consideran dos pares de genes, los de cada par se reparten y combinan de forma independiente.» (N.P., 17 años)

«Las parejas de genes que se forman al unirse dos gametos se producen al azar» (M.A., 17 años).

Parte de este conocimiento declarativo determina las reglas de producción que emplea el alumno, por ejemplo:

«Cuando tenemos genes diferentes en uno de los padres, se producen dos gametos diferentes» ( $Aa \rightarrow A, a$ ); «con igual probabilidad.» ( $1/2 A, 1/2 a$ ) (O.R., 17 años)

«Cuando el genotipo es del tipo  $AaBb$  se producen cuatro tipos de gametos:  $A$  con  $B$ ,  $A$  con  $b$ ,  $a$  con  $B$  y  $a$  con  $b$ », «con la misma probabilidad.» ( $1/4$ ) (M.G., 17 años)

O las empleadas en la elaboración de los cuadros de Punnett:  $A$  con  $a =$  genotipo  $Aa$ ;  $A$  con  $b = Ab$ , etc. Todo ello permite al alumno la construcción de la estructura de sus modelos mentales. Es decir, aunque el conocimiento declarativo del alumno puede parecer poco relevante para la resolución de los problemas, debe destacarse la importancia que éste tiene en la forma de proceder. Una estructura con incoherencias, por ejemplo, en la que imperen reglas de producción sin fundamentación o apoyo en determinados principios, se muestra débil, inestable e incapaz de acomodar variaciones o anomalías en los modelos que de ella derivan. La tabla I refleja las dificultades en la construcción de estructuras científicamente aceptables y su relación con la producción de esquemas revisados incorporando anomalías.

En cuanto a la estrategia de control global que ejecuta el alumno, ésta se basa en dos tareas que repite cíclicamente:

1) Decide en cada momento qué regla hay que aplicar sobre la situación problema, creando modelos de solución del mismo.

2) Comprueba si en un modelo se cumple una condición final que pone fin al proceso; es decir, considera satisfactoria la solución del problema.

Este tipo de control ha sido identificado también por Hafner y Stewart (1995), revisando modelos explicativos empleados por los alumnos para acomodar fenómenos genéticos anómalos.

### Representación de los problemas

Al resolver el problema, el alumno crea un espacio mental experimental en el que representa secuencialmente cada uno de los estados del problema (Klahr y Dunbar, 1988), de forma que la solución que refleja en su cuaderno (Anexos I y II) representa precisamente una secuencia de estados o episodios, que va desde el *estado inicial*, determinado por la estructura inicial del modelo mental, al *estado final* del problema, modelo mental suficiente. El conjunto de estados posibles en cada problema constituye el «espacio de estados» que atraviesa el pensamiento del alumno. Para pasar de uno a otro, el alumno emplea determinados *operadores o reglas de producción* que se ajustan tanto en su forma como en sus condiciones de aplicabilidad a las condiciones restrictivas dadas en el planteamiento del problema, ya que, dadas esas condiciones relativas, no todas las posibilidades constituyen estados admisibles. También podríamos decir que cada estado intermedio se alcanza cuando se cubren determinados objetivos intermedios. Estos objetivos definen subproblemas que el alumno crea para llegar al estado final y cuya solución requiere de una sola operación.

Por ejemplo, cuando O.R. (17 años) busca las características de la segunda generación filial en un problema donde la población parental es  $AA \times aa$ , en primer lugar, resuelve el subproblema de encontrar la descendencia de la primera generación filiar empleando como reglas de producción el principio de segregación independiente (específico de este dominio cognitivo), la noción de *combinación* y la noción de *correlación* necesaria para establecer la causalidad (esquemas operatorios formales genéricos descritos por Inhelder y Piaget, 1955) y determinado conocimiento explícito sobre el significado genético de los símbolos empleados. Una vez resuelto este subproblema, con sus resultados se afronta un nuevo estado en el que otra vez entran en juego reglas de producción genéricas y específicas, junto con otro tipo de representaciones requeridas para resolver el nuevo subproblema.

Generalmente, en el proceso de búsqueda se emplea información acerca del dominio del problema que no está presente en la definición del mismo y que es espe-

cífica de una clase dada de problemas. Los esquemas que se activan portan esa información, al tiempo que «huecos» o variables que se «rellenan» con los datos del problema o que se infieren al efecto. Con esa información, el sujeto activa y elabora reglas heurísticas *ad hoc* que ayudan a dirigir la búsqueda de la solución.

Tomando como referencia la «mecánica» anteriormente descrita se analizaron las representaciones de los problemas que desarrollaban los seis alumnos entrevistados. A partir de las grabaciones y de lo reflejado por ellos en el papel, se determinaba el conjunto de estados o subproblemas que constituían el espacio problema construido mentalmente por el alumno. Para cada tipo nuevo de problema, el estado final implicaba el empleo de un nuevo modelo mental, más genérico (contempla un mayor número de causas posibles) y consistente (se aplica a un mayor número de problemas), al que denominamos *modelo final*.

La capacidad del modelo final para acomodar los cruzamientos realizados también fue analizada (Tabla I). Cuando un modelo acomodaba el 100 % de los cruzamientos intentados, éste debería explicar tres grandes aspectos de los datos: *a)* características cualitativas, es decir, las clases de fenotipos producidos en cada cruzamiento; *b)* características cuantitativas, o sea las ratios de las clases fenotípicas producidas en cada cruzamiento; y *c)* características generacionales de los datos, es decir, los «mapeos» genotipo-fenotipo de los individuos de la descendencia en cada cruzamiento y los mapeos asociados con los individuos que actúan como progenitores, manteniendo el principio de *consistencia*.

Los problemas en los que se producía un modelo final se valoraban en términos de la satisfacción o no del alumno con ellos. La satisfacción del alumno se ponía en evidencia frecuentemente de forma directa en su pensamiento en voz alta. Si los alumnos habían finalizado el proceso de resolución de un problema dado y no indicaban directamente su satisfacción o no, se les preguntaba por ello. Cuando el alumno mostraba satisfacción, se analizaba el porcentaje de cruzamientos que el alumno usaba para explicar y determinar el valor predictivo de su modelo. Estos porcentajes proporcionaban información sobre cuándo decide el alumno que el modelo revisado es *suficiente*.

#### *Análisis de la construcción del modelo mental*

Basándose en el proceso de resolución seguido por los diferentes alumnos y alumnas entrevistadas, se ha tratado de identificar evidencias a favor de la existencia de un determinado proceso mental inferencial en su memoria funcional; un proceso en el que tiene lugar la construcción y evaluación de modelos mentales diferentes. A partir de ellas se deducen los siguientes heurísticos:

1) El alumno genera en su mente un espacio problema inicial en el que representa la estructura o *topología* del sistema: objetos, estados y procesos. Para ello lleva a cabo una exploración sistemática del enunciado del problema. Seguidamente revisa los diferentes estados

*probables*, empleando la noción de *probabilidad* (esquema propio de la operatoria formal identificada por Inhelder y Piaget, *op. cit.*), que pueden surgir en el mundo del problema.

#### Evidencias

A. En primer lugar, todos los sujetos, asignan a diferentes símbolos representativos de los individuos, sus características fenotípicas y genotípicas (Anexos I y II, como ejemplo).

B. Definen un tipo determinado de cruzamiento (Anexos I y II).

C. Llevan a cabo cruzamientos entre individuos con el mismo fenotipo y los repiten usando diferentes individuos para establecer mapas genotipo-fenotipo en problemas en los cuales más de un genotipo corresponde a un fenotipo.

2) Utiliza un esquema específico de este dominio cognitivo como plantilla para interpretar las características de la exploración del espacio de cruzamiento (resultados del cruzamiento) que: estén de acuerdo con los resultados previsibles del modelo; que no lo estén (reconocimiento de anomalías). En esta situación –proceso de proyección (De Kleer y Brown, *op. cit.*)– hace uso del principio de correspondencia entre los datos y el modelo.

#### Evidencias

A. Emplean esquemas de dominancia simple ( $C_0$ ), por defecto.

B. Por ejemplo, usan el esquema de codominancia ( $C_2$ ) como plantilla para interpretar: seis variaciones de una misma característica, situación considerada anómala.

3) Utiliza un esquema existente como plantilla para postular factores causales adicionales (cambios en objetos, estados y procesos) operando en un nuevo tipo de problema. Así, verifica la *robustez* del modelo mental generado.

#### Evidencias

A. Todos los alumnos y alumnas usan el esquema de dominancia simple ( $C_0$ ) como plantilla para postular la correspondencia entre un genotipo y dos variaciones fenotípicas.

B. Usan el esquema de codominancia ( $C_2$ ) como plantilla para postular: un gen determina la variación fenotípica de dos características (Anexo I), o la existencia de un tercer alelo en otro problema.

C. Cuatro alumnos usan un esquema de alelismo múltiple ( $C_3$ ) de tres alelos, seis variaciones, como plantilla para postular la correspondencia entre dos genotipos y una variación fenotípica; tres genotipos y una variación fenotípica en otro problema.

D. Cinco alumnos usan el esquema de alelismo múltiple ( $C_3$ ) de tres alelos, cinco variaciones, como plantilla para postular una segunda variación fenotípica que se corresponda con dos genotipos; en otro problema, tres genotipos con una variación fenotípica.

E. Ídem ( $C_3$ ) para postular la existencia de pleiotropía.

F. Cuatro usan el esquema de meiosis ( $C_1$ ) como plantilla para postular el ligamiento de genes al cromosoma X e Y.

G. Todos ellos, usan el esquema de ligamiento al sexo ( $C_6$ ) como plantilla para postular la influencia del sexo.

4) Redescribe un esquema empleado en el pasado. Elige un esquema que pueda acomodar gran número de tipos de problemas, y de ese modo proporcione explicaciones unificadas en la disciplina.

Evidencias

A. Tres alumnos, utilizan un esquema de alelismo múltiple ( $C_3$ ) de tres alelos, seis variaciones, para explicar cinco variaciones, reconstruyendo el modelo generado de forma que dos de los genotipos se correspondan con un sólo fenotipo.

B. Cuatro, utilizan un esquema de alelismo múltiple ( $C_3$ ), tres alelos y cinco variaciones, para explicar cuatro variaciones, reconstruyendo el modelo mental generado de forma que tres genotipos se correspondan con un sólo fenotipo.

C. Tres, utilizan un esquema de ligamiento autosómico ( $C_7$ ) para explicar un caso de ligamiento al sexo. Consideran X e Y como alelos (no cromosomas) y los ligan a otros alelos de un gen de un autosoma.

D. Todos utilizan un esquema de dominancia simple ( $C_0$ ) para explicar la determinación del sexo. Revisan la correspondencia genotipo-fenotipo para acomodarla a la ratio 1:1.

5) Interpola, es decir, agrupa el caso considerado junto a otros casos.

Evidencia

Tres de los alumnos entrevistados agrupan un problema de alelismo múltiple ( $C_3$ ), tres alelos, cinco variaciones, con un esquema de tres alelos en el que cada uno de los seis genotipos se corresponden con una variación fenotípica separada y un esquema de dos alelos en el que más de una variación fenotípica se corresponde con un genotipo dado, en un intento de reconstrucción del modelo mental generado.

6) Fragmenta problemas de mayor complejidad causal en subproblemas independientes, aplicando esquemas causales diferentes a cada subproblema. Seguidamente, aborda la naturaleza de la posible dependencia entre los subproblemas.

Evidencia

Cinco de los seis sujetos entrevistados consideran un problema tipo de alelismo múltiple ( $C_3$ ), tres alelos y seis variaciones, como dos problemas independientes de codominancia ( $C_2$ ).

7) Utiliza relaciones limitantes o definitorias de un esquema existente para:

a) postular factores causales adicionales;

b) explorar las implicaciones de un cambio en un componente (objeto, estado o proceso) del modelo mental generado por otros componentes.

Evidencia

Todos utilizan las relaciones limitantes del esquema existente (número de relaciones permitidas de dominancia ( $C_0$ ) o genotipos homocigóticos) como base para postular la existencia de alelos adicionales ( $C_3$ ).

8) Contrasta el modelo mental redescrito con los datos antes de llevar a cabo «mapeos» específicos.

Evidencia

Todos contrastan el número posible de genotipos de su modelo mental con el número de variaciones para una característica antes de «mapear» los genotipos con los fenotipos específicos.

9) Usa la redescipción de un modelo mental para determinar la estructura del espacio problema revisado y explora sistemáticamente porciones de ese espacio anteriormente no exploradas.

Evidencia

Todos usan un modelo redescrito para predecir los resultados de posibles cruzamientos no realizados previamente.

10) Usa la memoria funcional para representar la exploración en el espacio del modelo mental.

Evidencia

Todos mantienen recuerdos de cruzamientos realizados en términos de variaciones de parentales y descendientes, de número de clases fenotípicas y «mapeos» genotipo-fenotipo realizados.

Cuando los alumnos reconocen anomalías, tras emplear un determinado esquema causal, proponen factores causales adicionales que pueden ser responsables de las diferencias percibidas; es decir, proponen cambios en la estructura del modelo: objetos, procesos y estados (Anexo I). Así, en doce problemas, los alumnos exploraban las implicaciones que un cambio en un componente estructural del modelo tiene para otros componentes.

El 80% de esas exploraciones condujo a soluciones acertadas. Por ejemplo, la revisión del número de alelos que operan en un problema tipo (tres en lugar de dos) llevaba a los alumnos y alumnas entrevistados a introducir un cambio en el número de genotipos posibles (seis en lugar de tres), que posteriormente comparaba con las variaciones existentes en el problema. De un total de 54 reconstrucciones de modelos, 31 implicaban cambios en el número de objetos, particularmente el número de alelos y 19 implicaban revisión de procesos. Entre ellos se incluían cambios en: el proceso bioquímico, más de dos genotipos correspondiendo a un sólo fenotipo, o un gen que determina las variaciones de más de una característica, o más de un fenotipo correspondiendo a un sólo genotipo, influencia del sexo, o la determinación del sexo de la descendencia por un par de alelos en lugar de por los cromosomas sexuales (no quiere decir esto que los cambios atribuidos fueran correctos). Sólo 4 de las 54 revisiones correspondían a cambios de estado, más específicamente, la asociación o ligamento de un gen a los cromosomas sexuales.

## DISCUSIÓN

Desde el punto de vista cognitivo, los resultados obtenidos en el estudio nos muestran dos procesos de resolución completamente diferentes. Los problemas que requieren razonamientos causa-efecto son resueltos aplicando un determinado algoritmo o patrón de respuesta. Sin embargo, los de tipo efecto-origen no son resueltos así. El alumno genera e interpreta datos de cruzamientos. Además, decide cuándo obtiene la solución. Estos problemas requieren que el alumno opere en un espacio problema experimental, realice inferencias de tipo causal y busque y emplee modelos con mayor poder explicativo y predictivo. Además, en este caso, añaden otra complejidad al proceso, el efecto de la inclusión de fenómenos anómalos de forma que el repertorio de causas que posee el estudiante resulte insuficiente para explicar los fenómenos.

Teniendo en cuenta el análisis anteriormente expuesto y las investigaciones realizadas en este campo, nuestra hipótesis es que esa insuficiencia altera la coherencia interna del pensamiento determinístico causal del alumno, poniendo en peligro la estabilidad de los principios de constancia –siempre que se produce C (causa), sobrevendrá E (su efecto) invariablemente– y productividad –E es siempre producido por C–. Estos principios son inherentes al pensamiento causal humano (Bunge, 1959). De este modo, el alumno se ve obligado a ampliar el repertorio causal del modelo de herencia genética o modificarlo, describirlo en palabras de Annette Karmiloff-Smith (1994), para acomodar los efectos anómalos. El resultado es un esquema mental de la genética mendeliana más consistente y complejo.

El conjunto de heurísticos identificados define una dinámica mental que de forma genérica se ha representado en la figura 1. Destaca el papel de los esquemas durante el proceso de construcción del modelo mental; en particu-

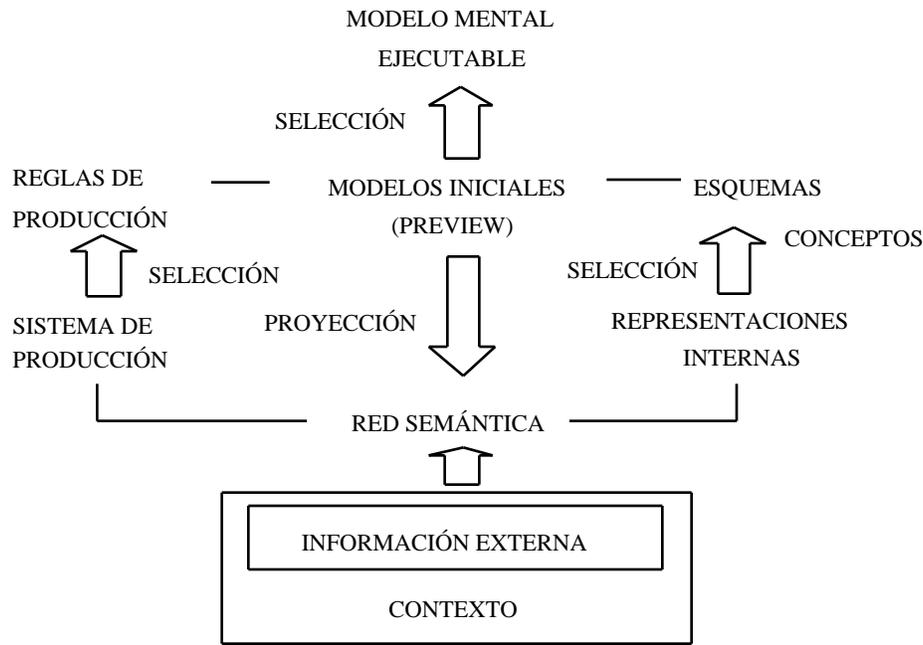
lar, el empleo de esquemas análogos para acomodar factores causales anómalos y generar así modelos ejecutables. Con ello se pone de manifiesto el papel de la analogía en la formación de los modelos durante la resolución de problemas efecto-origen en genética. La aparición en el espacio del problema de un conjunto amplio de modelos exige al sujeto el empleo de determinadas reglas de producción que limiten el número de modelos posibles (Anexo II). El uso de estas reglas posibilita la selección del modelo ejecutable. Una vez seleccionado éste, producida o no la redescritión del esquema inicialmente recuperado de la memoria, se contrasta con los datos del problema en un nuevo episodio mental. En este episodio, no sólo se tienen en cuenta los datos externos, sino que se explora nuevamente todo el espacio mental generado por el problema, probando la suficiencia del modelo seleccionado en situaciones anteriormente no contempladas y en todos los episodios del problema.

Aceptando la existencia de los principios causales anteriormente citados, las dificultades que manifiestan los alumnos al resolver problemas de genética pueden interpretarse empleando un esquema de pensamiento basado en la teoría de los modelos mentales mecánicos elaborada por De Kleer y Brown (1981, 1983, 1984). Aunque dicha teoría fue desarrollada para ilustrar cómo son los modelos mentales que los sujetos construyen intuitivamente cuando observan un sistema físico dinámico, ha sido empleada en el análisis de situaciones problema de naturaleza similar a las generadas en el aula (Gutiérrez, 1996). En la propuesta representada en la figura 1, destaca el papel de los postulados de significado en la construcción del modelo (red semántica). En palabras de Johnson-Laird (1990, p. 314), «los postulados de significado –como yo los llamo– asumen que la comprensión consiste en traducir las emisiones a un lenguaje mental, y, entonces, si es necesario, utilizar postulados de significado para hacer inferencias a partir de ellos». Las dificultades conceptuales o las diferencias de percepción citadas por Smith y Good (*op. cit.*), se explican en base al papel de la red semántica empleada para representar la estructura del sistema; la topología del sistema en el modelo de De Kleer y Brown (*op. cit.*). Errores de «etiquetado», es decir, de asignación de objetos, procesos y estados del modelo conducen a estructuras diferentes y, por tanto, a modelos iniciales distintos de un mismo problema.

Las dificultades relacionadas con el enfoque de los problemas y las estrategias de resolución, evidentemente, son más difíciles de explicar. Hasta ahora, en la investigación didáctica, éstas han permanecido aglutinadas dentro de una especie de caja negra. Por supuesto, cada tipo de problema lleva asociado un objetivo distinto: aplicar un esquema causal conocido o encontrar uno válido entre un conjunto de posibilidades (Johnson y Stewart, *op. cit.*; Stewart y Hafner, *op. cit.*). Pero, en el segundo caso, se puede operar por ensayo y error (tendencia manifestada por muchos estudiantes) o bien empleando reglas de producción determinadas por las restricciones que operan sobre un conjunto de estados posibles del problema. Estas restricciones derivan del

Figura 1

Esquema de la posible interacción entre los esquemas mentales, las reglas de producción y los modelos mentales. Las líneas sencillas representan procesos simultáneos de procesamiento en paralelo a la información. El proceso de proyección permite, a través de un proceso de contrastación con la información de procedencia externa, discernir qué tipos de heurísticos o de convenciones son las más adecuadas para establecer grados de correspondencia entre los modelos generados y los datos, y seleccionar el que se manifieste ésta con mayor grado.



enunciado del problema. Así, las dificultades del alumno tendrán su origen en la construcción de los modelos mentales del problema y en la selección de aquél que manifieste un mayor grado de correspondencia con los datos disponibles. Como hemos expuesto anteriormente, el modelo propuesto por De Kleer y Brown (*op. cit.*), integrado en la propuesta de la figura 1, se muestra especialmente valioso para la comprensión de este proceso, guiando la observación del interior de esa «caja negra».

Finalmente, las dificultades de tipo operatorio (a veces vinculadas al grado de desarrollo cognitivo del individuo) citadas por Browning y Lehman (*op. cit.*), quedan perfectamente diferenciadas dentro del modelo propuesto. El empleo de determinadas reglas de producción asociadas a cada esquema constituye la base del mecanismo de construcción del modelo mental. Si no se ejecutan correctamente, no se lograrán modelos válidos. Esto puede dificultar el proceso de proyección hasta el punto de bloquear el estado del problema y la posibilidad de alcanzar una respuesta.

**Implicaciones educativas**

Una de las propuestas didácticas más relevantes de las últimas décadas es la que considera que el proceso

de enseñanza ha de llevarse a cabo en el contexto de la percepción cognitiva (Collins et al., 1989). La percepción cognitiva se refiere a la adaptación de los métodos de la percepción a la enseñanza y aprendizaje de destrezas cognitivas; en este caso, los heurísticos de resolución de problemas efecto- causa. Esto requiere la externalización de procesos que generalmente se llevan a cabo internamente. Los métodos de enseñanza en el contexto de la percepción cognitiva deben «abrir» estos procesos tácitos y ayudar a los alumnos a observarlos, establecerlos y utilizarlos. En este contexto y en base a la dinámica de resolución de problemas descrita en este artículo, los docentes podríamos mejorar el desarrollo de dichos procesos poniendo mayor énfasis en la resolución de problemas de genética de tipo efecto- causa (frente a los de tipo causa- efecto) para favorecer el desarrollo de destrezas cognitivas de alto nivel. En este tipo de problemas, deberíamos incidir en cuatro aspectos fundamentales de la dinámica de resolución:

- 1) Favoreciendo la explicitación, por parte del alumno, de la topología del sistema (objetos, estados y procesos) para evitar en lo posible errores de etiquetado.
- 2) Facilitando el proceso de proyección al aportar esquemas específicos claros que puedan servir de plantillas.

3) Cuestionando la robustez de los modelos generados por los alumnos para provocar la reflexión y facilitar la selección y adopción de modelos científicamente válidos.

4) Finalmente, proporcionando al alumno relaciones limitantes o definitorias de un determinado esquema para incitarle a postular factores causales adicionales y a explorar las implicaciones de cambios en la topología del sistema.

Aunque lograrlo no sea tarea fácil, no cabe duda de que el avance en el conocimiento de las formas de percepción y de representación mental de conocimientos científicos particulares podrá contribuir notablemente a mejorar nuestra labor docente.

## NOTA

<sup>1</sup> Denominamos *dominio* al «conjunto de representaciones que sostiene un área específica de conocimiento; por ejemplo, las matemática, el lenguaje, la física...».

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AYUSO, E., BANET, E. y ABELLÁN, T. (1996). Introducción a la genética en la enseñanza secundaria y el bachillerato. II. ¿Resolución de problemas o realización de ejercicios? *Enseñanza de las Ciencias*, 14(2), pp. 127-142.
- BROWNING, M.E. y LEHMAN, J.D. (1988). Identification of students misconceptions in genetics problem solving via computer program. *Journal of Research in Science Teaching*, 25(9), pp. 747-761.
- BUNGE, M. (1959). Causality. The place of the Causal Principle in modern Science. Cambridge: Harvard University Press.
- COLLINS, A., BROWN, J.S. y NEWMAN, S.E. (1989). Cognitive apprenticeship: teaching the crafts of reading, writing, and mathematics, en Resnick, L.B. (ed.). *Knowing, learning and instruction: Essays in honor of Robert Glaser*. Hillsdale. Nueva Jersey: Lawrence Erlbaum.
- DE KLEER, J. y BROWN, J.S. (1983). Assumption and ambiguities in mechanistic mental models, en Gentner, D. y Stevens, A.L. (ed.). *Mental Models*, Hillsdale. Nueva Jersey: Lawrence Erlbaum.
- DE KLEER, J. y BROWN, J.S. (1981). Mental Models of physical mechanism and their acquisition, en: Gentner, D. y Stevens, A.L. (eds.), *Mental Models*, pp. 155-190. Hillsdale. Nueva Jersey: LEA.
- DE KLEER, J. y BROWN, J.S. (1984). A qualitative Physics based on Confluences. *Artificial Intelligence*, 24(1), pp. 7-83.
- GUTIÉRREZ, R. (1996). Modelos mentales y concepciones espontáneas. *Alambique*, 7, pp.73-86.
- GUTIÉRREZ, R. y OGBORN, J. (1992). A causal framework for analysing alternative conceptions. *International Journal of Science Education*, 14(2), pp. 201-220.
- HAFNER, R. y STEWART, J. (1995). Revising Explanatory Models to Accomodate Anomalous Genetic Phenomena: Problem Solving in the «Context of Discovery». *Science Education*, 79(2), pp. 111-146.
- INHEDER, B. y PIAGET, J. (1955). The Growth of Logical Thinking from Childhood to Adolescence. Londres: Routledge and Kegan Paul.
- JOHNSON, S.K. y STEWART, J. (1990). Using philosophy of science in curriculum development: An example from high school genetics. *International Journal of Science Education*, 12(3), pp. 297-307.
- JOHNSON-LAIRD, P.N. (1985). Mental Models, en Aitkenhead, A.M. y Slack, J.M. (eds.). *Issues in cognitive modelling*, pp. 81-99. Londres: LEA-Open University Press.
- JOHNSON-LAIRD, P. N. (1990). *El ordenador y la mente: introducción a la ciencia cognitiva*. Madrid: Paidós.
- KARMILOFF-SMITH, A. (1994). *Más allá de la modularidad: la ciencia cognitiva desde la perspectiva del desarrollo*. Madrid: Alianza Editorial.
- KERLINGER, F.N. (1985). *Enfoque conceptual de la investigación del comportamiento*. México: Interamericana.
- KLAHR, D. y DUNBAR, K. (1988). Dual space search during scientific reasoning. *Cognitive Science*, 12, pp. 1-48
- MINSKY, M. (1968). Descriptive Languages and Problem Solving, en Minsky, M. (ed.). *Semantic Information Processing*, pp. 419-424. Cambridge: The MIT Press. Ma.
- NORMAN, D.A. (1983). Some observations on Mental Models, en Gentner, D. y Stevens, A.L. (eds.). *Mental Models*, pp. 15-33. Hillsdale. Nueva Jersey: LEA.
- PASK, G. (1975). *Conversation, Cognition and Learning*. Amsterdam: Elsevier.
- RODRÍGUEZ, M.L. y MOREIRA, M.A. (1999). Modelos mentales en la estructura y el funcionamiento de la célula: dos estudios de casos. *Investigações em Ensino de Ciências*, 4(2); <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/revista.htm>
- SMITH, M. y GOOD, R. (1984). Problem solving and classical genetics: Successful versus unsuccessful performance. *Journal of Research in Science Teaching*, 21(9), 895-912.
- SMITH, M.U. (1988). Successful and unsuccessful problem solving in classical Genetic Pedigrees. *Journal of Research in Science Teaching*, 25(6), pp. 411-433.
- STEWART, J. (1983). Student problem solving in high school Genetics. *Science Education*, 67(4), pp. 523-540.
- STEWART, J. y HAFNER, R. (1991). Extending the conception of «problem» in problem solving research. *Science Education*, 75(1), pp. 105-120.
- WALKER, R.A., HENDDRIX, J.R. y MERTENS, T.R. (1980). Sequenced instruction in genetics and piagetian cognitive development. *The American Biology Teacher*, 42(2), 104-108.

[Artículo recibido en septiembre de 1999 y aceptado en febrero de 2000.]

ANEXO I

PROBLEMA

Enunciado

Cuando las gallinas con plumaje blanco moteado son cruzadas con aves de plumaje negro, toda su descendencia es azul pizarra (azul andaluz). Cuando las aves azul andaluz son cruzadas entre sí, producen descendencia blanca moteada, azul y negra en la proporción 1:2:1 respectivamente.

- a) ¿Cómo son heredados estos rasgos del plumaje?
- b) Indica los genotipos para cada fenotipo usando los símbolos apropiados.

Respuesta del alumno y análisis de la misma

REPRESENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA

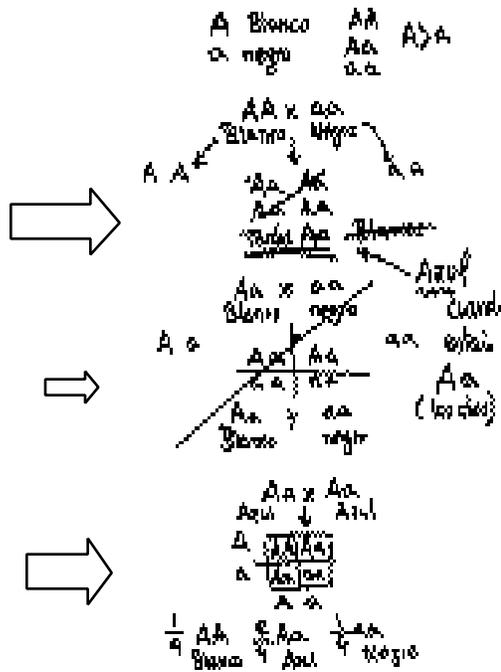
Asignación de objetos y tipos de cruzamiento

SEGREGACIÓN DE REGLAS DE PROBABILIDAD

REDUCCIÓN DEL ESPACIO DE ESTADOS PROBABLES

NUEVO ESTADO DEL PROBLEMA

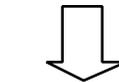
SEGREGACIÓN DE REGLAS DE PROBABILIDAD



Esquema Inicial Co

ESPACIO DE ESTADOS PROBABLES

PROYECCIÓN (Correspondencia con los datos)



Identificación de anomalías



REDESCRIPCIÓN NUEVAS CAUSAS ESQUEMA C2

ANEXO II

PROBLEMA

Enunciado

Un hombre demanda el divorcio de su esposa alegando infidelidad. El hombre reconoce como hijos suyos al primero y al segundo, cuyos grupos sanguíneos son 0 y AB respectivamente. Sin embargo, no reconoce al tercer hijo cuyo grupo sanguíneo es de tipo B. a) ¿Puede esta información servir de base para saber si el tercer hijo es de ese esposo? b) El esposo se hizo otra prueba en el sistema de grupo sanguíneo M-N. El tercer hijo es del grupo M, el esposo es del N. ¿Puede esta información ser usada en apoyo de la demanda del hombre?

Respuesta del alumno y análisis de la misma

REPRESENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA

ASIGNACIÓN DE OBJETOS ESTADOS Y PROCESOS

CREACIÓN DEL ESPACIO DE ESTADOS PROBABLES

MODELOS INICIALES

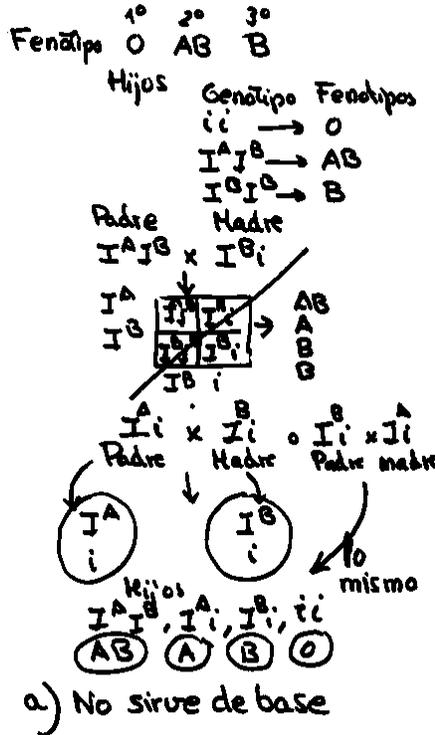
APLICACIÓN DE REGLAS

RUNNING

SELECCIÓN

PROYECCIÓN CORRESPONDENCIA CON LOS DATOS

INFERENCIA



RECUPERACIÓN DE ESQUEMAS PREVIOS ASIGNACIÓN DE ESQUEMAS CAUSALES TIPO C3

EL ALUMNO PERCIBE LA NECESIDAD DE RESTRICCIONES PARA REDUCIR EL ESPACIO DE ESTADOS PROBABLES



REGLA CONDICIONAL Si un hijo es 0, entonces el padre tiene que tener i y la madre también. Si otro hijo es AB, entonces el padre será A o B y la madre al contrario.