

Genética mendeliana y teoría cromosómica: un desfase vigente en la educación universitaria

Sergio G. Rodríguez-Gil¹

Marco A. Carballo-Ontiveros²

América N. Castañeda-Sortibrán^{2*}

<https://orcid.org/0000-0003-4608-1961>

<https://orcid.org/0000-0002-0225-0949>

<https://orcid.org/0000-0002-1206-4971>

¹ Centro de Estudios Parasitológicos y de Vectores (CEPAVE-CONICET-UNLP Asoc. CICPBA), La Plata, Argentina; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina. Universidad Nacional de San Martín - IIB-INTECH-Chascomús (Correo-e: sergiorodriguezgil@cepave.edu.ar)

² Facultad de Ciencias, UNAM, Ciudad de México, México (Correo-e: m.carballoontiveros@ciencias.unam.mx, nitxin@ciencias.unam.mx)

* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia.

Recibido Jun. 7, 2023; Aceptado Ago. 10, 2023; Versión final Sep. 30, 2023, Publicado Feb. 2024

Resumen

El presente estudio evalúa la habilidad de estudiantes de pregrado universitarios para relacionar el proceso de meiosis (formación de gametos) con la segregación de rasgos fenotípicos (cuadrado de Punnett). Dos grupos de estudiantes procedentes de dos universidades independientes realizan historietas para resolver dos problemas de genética presentados en una secuencia didáctica. Los resultados muestran que los estudiantes utilizan principalmente explicaciones probabilísticas mediante el uso del cuadrado de Punnett, pero de forma inconexa con la meiosis. Se evidencia la confusión al explicar conceptos básicos de la genética y la dificultad de explicar estos fuera de un contexto académico (alumno-profesor). La forma aislada en la que se imparten los temas de meiosis y probabilidad incide que el alumno no pueda resolver un problema a partir de la meiosis ni relacionar meiosis con probabilidad en gametogénesis (generación de gametos). En conclusión, se sugiere enseñar el tema de meiosis y probabilidad de una forma conjunta e interrelacionada.

Palabras clave: enseñanza de genética mendeliana; probabilidad; meiosis; cuadrado de Punnett; habilidades para resolver problemas

Mendelian genetics and chromosome theory: current gap in university education

Abstract

The present study assesses the ability of university undergraduate students to relate the process of meiosis (formation of gametes) with the segregation of phenotypic traits (Punnett square). Two student groups from two different universities solve two genetics problems presented in a didactic sequence by making comics. The results show that students provide probabilistic explanations by using the Punnett square, but without making a connection with meiosis. They show confusion when explaining fundamental genetics concepts and have difficulty explaining them outside the academic context (student-teacher). The isolated manner in which meiosis and probability are taught have an influence on students not being able to solve meiosis problems and on their inability of linking meiosis to probability in gametogenesis (generation of gametes). In conclusion, it is suggested to teach the subject of meiosis and probability in a together and correlatively.

Keywords: teaching of mendelian genetics; probability; meiosis; Punnett square; problem-solving skills

INTRODUCCIÓN

El impacto de la enseñanza de la genética radica en el desarrollo de habilidades intelectuales, razonamiento y hábitos de trabajo que caracterizan el trabajo de los científicos (Ayuso y Banet, 2002). El conocimiento de la genética es fundamental para comprender las relaciones fenotípicas entre los individuos y la descendencia que pueden generar. El área de conocimiento de la biología es muy amplia y en ella se encuentran los contenidos de la genética que están entre los más difíciles de enseñar y aprender, por lo que no sorprende que la genética sea mal entendida por todos los grupos de edad (Richards y Ponder, 1996). Para nosotros es importante determinar la base de las dificultades de los estudiantes en este campo para sugerir metodologías innovadoras en su enseñanza (Caballero-Armenta, 2008).

Una de las dificultades que suele existir es la imposibilidad de relacionar el proceso de meiosis y segregación de rasgos. Cuando se abordan estos temas, el análisis de la herencia mendeliana de rasgos discretos usando el cuadrado de Punnett se estudia por separado de la meiosis (Batzli *et al.*, 2014), disociación que explicaría por qué muchos estudiantes tienen dificultades para entender el proceso de la meiosis (Kalas *et al.*, 2013; Rodríguez-Gil *et al.*, 2018). Conocer el proceso de la meiosis no sólo es esencial para comprender las Leyes de Mendel, sino también para comprender eventos citogenéticos complejos. Es por ello que ambos procesos deben ser explicados de manera relacionada.

Después de muchos años de impartir cursos de genética, notamos que los estudiantes podían resolver problemas de herencia mendeliana sin tener el conocimiento del proceso de meiosis, utilizando únicamente las probabilidades de obtener gametos en el cuadrado de Punnett, esto mismo se ha documentado por otros autores, sin embargo, los alumnos tienen dificultad para interpretar estos símbolos alélicos refiriéndolos a procesos biológicos (Wynne *et al.*, 2001). Esta situación nos llevó a realizar una experiencia didáctica a partir de la cual abordamos el problema de la disociación del aspecto biológico, del matemático, que históricamente se ha reflejado en los artículos de las que llamaremos escuelas empíricas y teóricas, centrándose las primeras en la teoría cromosómica de la herencia y estas últimas basando su análisis en el uso del cuadrado de Punnett.

OTROS ANTECEDENTES

Hay una serie de antecedentes adicionales que es necesario detallar para documentar en mejor forma este trabajo: i) Mendel frente a la teoría cromosómica de la herencia; y ii) Enseñanza de la genética.

Mendel frente a la teoría cromosómica de la herencia

La diferencia entre la resolución de problemas en genética 1) con base en el cuadrado de Punnett y 2) a partir de la formación de gametos a través de la meiosis es un tema complejo que ha sido poco abordado en la literatura (Bierema y Schwartz, 2016). La disociación entre la escuela que abordaba el tema desde una perspectiva de laboratorio y la escuela que lo abordaba desde una perspectiva teórico-matemática data casi del momento del redescubrimiento de las Leyes de Mendel (Van Balen, 1987). Esto llevó a puntos de vista divergentes y al principio no se apoyaban entre sí. Aún hoy los profesores los enseñan como si fueran dos temas diferentes para que los estudiantes puedan resolver un cruce con un cuadrado de Punnett sin usar la meiosis que produjo los gametos que se usaron para crear el cuadrado de Punnett en el que se representan tanto los tipos de gametas generados por los progenitores, como las probabilidades de generación de los mismos y finalmente se pueden predecir las frecuencias tanto de los genotipo como de los fenotipos de la descendencia (Bierema y Schwartz, 2016).

Nuestro punto de partida es a principios de 1900 con los "empiristas" cuando en 1902 Sutton (2009), en su trabajo sobre la meiosis de *Brachystola magna*, sugiere que el comportamiento de los cromosomas durante la meiosis y su reducción en número podría constituir la base física de las leyes Mendelianas, diciendo: *"Finalmente puedo llamar la atención sobre la probabilidad de que la asociación de los cromosomas paternos y maternos en pares y su posterior separación durante la división reductora como se indicó anteriormente, pueda constituir la base física de la ley mendeliana de la herencia"*. Boveri (1902) desarrolló completamente la hipótesis de Sutton, que incluía la orientación aleatoria de los cromosomas en la meiosis y la segregación independiente de factores ("mendelianos"). Carl Correns en 1900, también argumentó que los cromosomas podrían ser la explicación de los resultados obtenidos por Mendel y fue el primero en nombrar las "partículas" de Mendel como ABC/abc. Por otro lado, Stevens (1905), estudiando las abejas: *Aphis rosae* y *Aphis oenotherae*, descubrió que las células germinales de estos organismos tienen un comportamiento que se ajusta exactamente a lo que exigen las leyes de Mendel (Rheinberger, 2003). De esta forma, la teoría cromosómica de la herencia tomó relevancia para sustentar los descubrimientos de Mendel. Stevens (1905) también descubrió que había un cromosoma "extra" en uno de los sexos y relacionó esta información con la determinación del sexo, esta investigadora afirmó que Boveri (1902) tenía razón y que los cromosomas son

portadores de diferentes valores fisiológicos que representan caracteres morfológicos. Así, las células germinales tienen un comportamiento que se ajusta exactamente a lo exigido por las leyes de Mendel.

Los "teóricos" por su parte, iniciaron sus estudios con Punnett, quien en su segunda edición de "Mendelismo", en 1907, dieron forma matemática a los principios que Mendel había propuesto en 1866, permitiendo predecir probabilidades de aparición de genotipos en la descendencia, a partir de la probabilidad de formación de gametos de los progenitores en un cruce. Sin embargo, Punnett no reconoció la importancia de la teoría cromosómica de la herencia y tenía serias dudas sobre la relación entre los cromosomas y los factores mendelianos.

William Bateson (colaborador y supervisor de Punnett) consideraba que las "partículas" de Mendel no eran de naturaleza corpuscular o física, sino fuerzas, vectores y vórtices que impulsan los diferentes aspectos de los organismos (Rushton, 2022). Bateson consideró durante mucho tiempo que la citología no era relevante para la nascente disciplina de la genética, tras realizar un viaje a Estados Unidos, en el que visitó a Morgan y su grupo de trabajo, pudo observar preparaciones de cromosomas normales y anormales de *Drosophila*, y se le dijo que los caracteres alterados (mutantes) podrían estar asociados con patrones anormales observados en los cromosomas que se heredaban a la descendencia a través de los gametos (Coleman, 1970), esto, indirectamente implicaría que las características que se heredan a la descendencia se encuentran físicamente localizadas en los cromosomas.

Por su parte, Punnett también acabó reconociendo la importancia de los cromosomas en la herencia, añadiendo en la edición de 1922, de su libro "*Mendelismo*", dos nuevos capítulos dedicados a este aspecto. El biólogo alemán Richard B. Goldschmidt en 1938, reconocido por su trabajo experimental en genética del desarrollo y evolutiva, también se opuso a la teoría corpuscular del gen, es decir, no es una parte del cromosoma el que rige la herencia. Tal era su posición que en una carta dirigida a un compañero de estudios universitarios afirmó que esta teoría estaría "*tan muerta como el dodo*", se opuso a esta concepción de la herencia al proponer en su libro Fisiología genética de 1938 que el cromosoma completo es la verdadera unidad de la herencia (Dietrich, 1995).

Morgan *et al.* (1915), en su trabajo "El mecanismo de la herencia mendeliana", propusieron que el material hereditario se transportaba en los cromosomas, que a su vez portaban los "factores" que actualmente llamamos "genes" y que permanecían inalterables durante el ciclo celular. También propusieron que los factores (genes) se organizaban de forma lineal en el cromosoma y que durante la meiosis intercambiaban información con el cromosoma del otro progenitor, en lo que llamaron "entrecruzamiento". Sobre esta base, propusieron que la división celular ahora conocida como meiosis, en la que se reducía el número de cromosomas, era requerida por las leyes mendelianas. Finalmente, a través de los resultados del cruce con *Drosophila*, concluyeron que no todos los factores (genes) migraron de forma independiente, sino que algunos genes migraron de forma conjunta (ligados). Esta unión de resultados mendelianos y cromosómicos propuesta por Morgan, pasó a la historia como la "Teoría cromosómica de la herencia de Morgan" (Brush, 2002).

Es así que las conclusiones de Boveri así como las propuestas de la escuela de Morgan, aunque no aceptadas de inmediato, siguen siendo esencialmente correctas en la actualidad (Brush, 2002). De acuerdo con Martins (2010), Morgan fue un fuerte oponente tanto de la hipótesis cromosómica y la teoría mendeliana, hasta 1910-11, cuando se convirtió a ambas, este autor considera que a partir de ese momento, él y su grupo (Alfred Henry Sturtevant, Herman Joseph Muller y Calvin Blackman Bridges) se dedicaron intensamente al estudio de las mutaciones y patrones de herencia en *Drosophila*. Sturtevant (1965) también propone que este fue el punto de encuentro entre la citología y la genética, y que a partir de ese momento ambas áreas entraron en una relación íntima haciendo que los resultados de cada campo comenzaran a tener fuertes efectos entre ellos. Actualmente la separación histórica del estudio citológico de la meiosis y su concepción teórica en el cuadrado de Punnett sigue permeándose en los estudiantes a través de la enseñanza de los profesores de Genética y de la literatura, en la cual, generalmente estos temas se estudian de forma separada e inconexa tanto en los libros de texto como en el salón de clases.

Hoy sabemos que los genes se pueden definir como una secuencia de bases o nucleótidos que conforman el ácido desoxirribonucleico (ADN). Esta molécula contiene varios componentes que permiten que un gen se exprese, en muchas ocasiones en el fenotipo de un organismo, es decir, en sus características morfológicas externas. Los genes, ocupan un lugar físico en el cromosoma, al cual llamamos *locus*, en particular en este estudio analizamos genes cuya expresión se manifiesta en el patrón de coloración del pelaje de los gatos y también estudiamos cómo se entiende o no a la meiosis que da origen a los diferentes tipos de gametos de los progenitores asociada a la representación probabilística de la predicción de la formación de gametas, y a los fenotipos y genotipos de la progenie a través del cuadrado de Punnett. Para demostrar la observación antes mencionada, llevamos a cabo una secuencia didáctica con base en la realización de historietas por parte de los alumnos en las que ellos realizaron cruces mendelianos, dando respuesta a una situación problemática mediante sus conocimientos de la asignatura.

Encontramos que la íntima correlación entre la citología y la genética mendeliana a la que se refería Sturtevant, no se refleja actualmente en la enseñanza de la genética, al menos cuando se abordan los temas de meiosis y mendelismo. Notamos además que los estudiantes resolvieron las situaciones problemáticas exclusivamente desde un enfoque matemático, sin tener en cuenta el aspecto biológico, es decir, la formación de gametos durante la meiosis por parte de los padres.

Enseñanza de la genética

En Latinoamérica, las universidades continúan manteniendo la estructura tradicional de la educación (Erazo-Moreno *et al.*, 2023). En la asignatura obligatoria denominada Genética I, de la licenciatura en Biología de la Facultad de Ciencias, la forma de enseñanza es por lo general tradicional. Los alumnos atienden a la cátedra que dicta el profesor, esperando obtener los conocimientos necesarios para aprobar la asignatura. En la cuestión práctica, aunque existe una parte de laboratorio, en la que el alumno es el actor principal, muchas veces se dedica a seguir las instrucciones del profesor sin cuestionarse mucho acerca de los procedimientos que está llevando a cabo, por lo que le es difícil apropiarse del conocimiento que él mismo está generando.

La separación del tema de herencia, reproducción y meiosis en diferentes asignatura en el plan de estudios de Biología en la UNAM, explica en parte, la naturaleza abstracta y matemática con la que se aborda la herencia en la asignatura de de la Genética. En el programa oficial de la asignatura en la Facultad de Ciencias (UNAM) (México), no se tiene de forma explícita el tema de Meiosis, ya que este tema pertenece a asignaturas previas (específicamente en el cuarto semestre, en la asignatura de Biología Molecular de la Célula III), en cambio la formación de gametas a partir de una cruce mendeliana si se hace de forma explícita con el cuadrado de Punnett (Facultad de Ciencias, 2023). En la Universidad de San Martín (Argentina), los dos conceptos Meiosis y Punnett se abordan como unidades de la misma asignatura (Genética General), separados por apenas unas semanas de diferencia (UNSAM, 2023)

De acuerdo con Díaz *et al.*, 2020 *“la planeación es un instrumento de trabajo que facilita la organización, la ejecución y el control de la tarea administrativa por lo que debe estar en función de los objetivos y recursos para una mejor realización”*. El primer paso antes de llevar a cabo un curso, en nuestro caso, incluye lo que menciona Díaz *et al.*, 2020, es decir “una planeación didáctica”, en general, vertimos en un cronograma previo al inicio del curso todas las actividades que se llevarán a cabo a lo largo del curso, así como las fechas de las mismas. Las actividades se plasmaron en función de los objetivos que tiene nuestra tabla de especificaciones (Rodríguez-Gil *et al.*, 2023). Sin embargo dado que los estudiantes pueden faltar a clase porque salen a prácticas de campo, fue necesario construir una planeación flexible y progresiva, donde se consideraron las posibles ausencias de clase.

El profesor lleva la batuta de la clase, es quien decide el orden de los temas y la forma de explicarlos, en los grupos estudiados no hacemos hincapié en que lo que plasmamos como gametas en un cuadrado de Punnett en el pizarrón o en una diapositiva, es en realidad, el producto de un proceso biológico llamado Meiosis. Consideramos que esto ocurre de esta manera por una cuestión histórica de transmisión del conocimiento. El proceso de Meiosis se estudia por separado y termina en la producción de gametas, en tanto que al estudiar Mendelismo y unión de gametas, suele no recuperarse que esas mismas gametas se produjeron durante el proceso de Meiosis y se tiende a resolver los problemas de manera mecánica y matemática casi sin injerencia de las funciones biológicas involucradas. De manera similar aparece en la bibliografía de tal forma que el tema de Mendel pertenece a un capítulo y el de Meiosis a otro, incluso este último relacionado más a la Mitosis que a Mendel. De hecho es común ver por un lado la Mitosis y Meiosis y por otro las Leyes de Mendel (UCM, 2023). Incluso es posible ver que en la página de Wikipedia, se explica la historia de la Genética, la Teoría Mendeliana, dominancia, recesividad, ploidías con solo tres citas a la meiosis (dos que hacen referencia a las fases y una que dice que es consecuencia de la meiosis, solo de manera teórica) (Wikipedia, 2023), como ejemplo de lo que ya hemos discutido en el apartado *Mendel frente a la teoría cromosómica de la herencia*, de este mismo escrito.

PROCEDIMIENTOS Y MÉTODOS

Este trabajo se llevó a cabo empleando un enfoque cuantitativo de tipo básico, dado que, la finalidad fue el incremento del conocimiento científico, sin algún fin práctico inmediato. En cuanto al método, se aplicó el hipotético deductivo, haciendo la formulación de la hipótesis a partir de los fenómenos estudiados, que luego fueron corroborados y de manera deductiva para así llegar a conclusiones pertinentes con la investigación. En el caso del diseño, fue no experimental con un corte transeccional, aplicándose los instrumentos en un único tiempo predeterminado. Asimismo, el nivel de investigación realizado, fue descriptivo correlacional. El método empleado se desglosa en las siguientes cuatro subsecciones: 1) descripción de la población de estudiantes que participaron en el presente trabajo, 2) planeación didáctica 3) contexto de las situaciones problemáticas planteadas para el desarrollo de una historieta, 4) criterios de evaluación en las historietas obtenidas, 5) consentimiento informado, y 6) Tipo de análisis.

Población de estudio

Participaron cuarenta y cuatro (44) estudiantes de la asignatura de Genética de la licenciatura en Biología de la Universidad de San Martín, Argentina, y de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Estudiantes de quinto semestre de la UNAM y del primer semestre de la Universidad de San Martín. Las edades de los estudiantes varían de 20 a 24 años. A los estudiantes se les propuso representar la resolución de los ejercicios a través de historietas, lo cual en principio les pareció novedoso y divertido (comunicación oral por parte de los estudiantes). Se les dio una semana para poder llevar a cabo cada uno de los ejercicios.

Planeación didáctica

Como se trabajó con dos grupos a la par, ambos fueron atendidos con base en la misma metodología. La planeación didáctica se muestra en la figura 1, en forma más detallada en el cronograma y en la descripción completa de la secuencia didáctica (Rodríguez-Gil et al., 2023). Las actividades fueron tanto sincrónicas: clases y prácticas en el salón como asincrónicas (ejercicios y resolución de situaciones problemáticas). A grandes rasgos podemos comentar que los profesores impartieron primero en el caso de la UNAM, un repaso muy general de la meiosis (clase de una hora), en sesiones posteriores el tema de Genética Mendeliana y posteriormente el tema de Herencia Ligada al Sexo, con una serie de ejercicios en clase o bien los dos ejercicios asincrónicos que nos ocupan en este análisis.

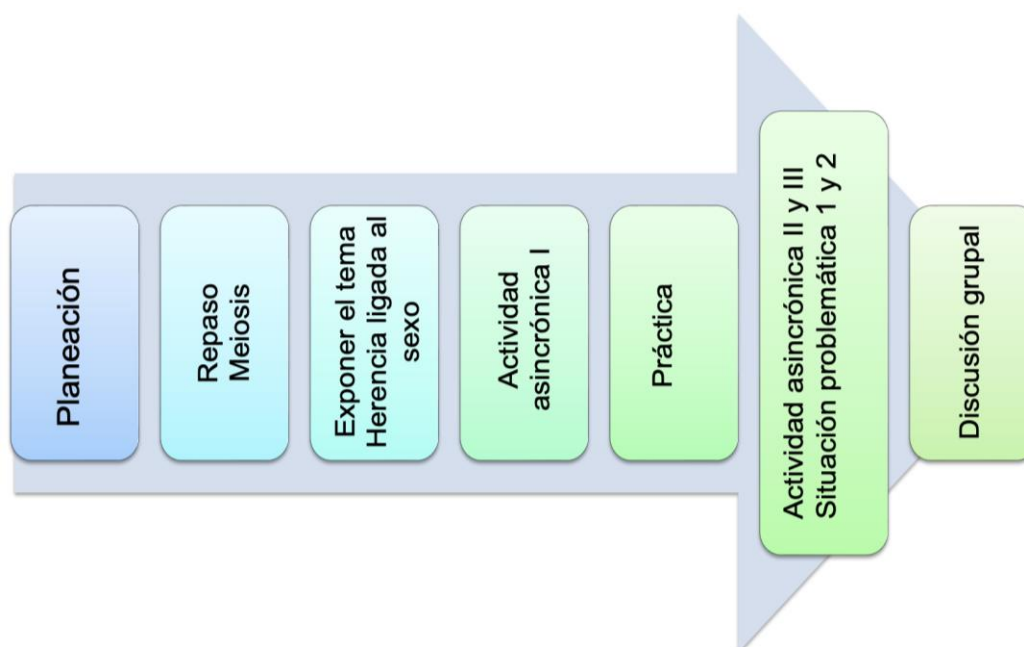


Fig. 1. Secuencia didáctica del curso grupo en la Facultad de Ciencias.

La organización de los contenidos en UNSaM consistió en: 4 horas teóricas de Mendel, 4 horas de resolución de problemas de Mendel, 4 horas de mitosis, Trabajo práctico de observación de división mitótica y luego 8 horas de abordaje de Meiosis luego apoyada en Trabajo práctico de observación microscópica de células en diferentes estadios de la meiosis.

Contexto de situaciones problemáticas

En ambas universidades los profesores impartimos Genética y propusimos situaciones problemáticas de cruces teóricos mendelianos, los estudiantes debían proponer una hipótesis a partir de la cual fueran capaces de predecir los genotipos y fenotipos de los progenitores y los descendientes de estos cruces. A los estudiantes se les proporcionó el siguiente texto: En los gatos domésticos, el pelaje puede ser, en el caso de los machos negro o naranja, mientras que las hembras pueden ser naranjas, negras o calicó (parte del pelaje es color naranja y otra parte color negro, formando manchas irregulares de cada color). El gen que codifica para el color del pelaje en los gatos, se encuentra en el cromosoma X. Recordemos que las hembras son XX y los machos XY. De una cruce, la mitad de las crías hembras eran calicó y la otra mitad negras. En cambio, la mitad de los machos eran naranjas y la otra mitad negros. Una estudiante recibe un gato calicó de esta descendencia y decide llamarla Katy. Con esta información se establecieron dos situaciones problema.

Situación problemática 1: Katy tuvo una camada en la que la mitad de las hembras eran calicó y la otra mitad negras, mientras que la mitad de los machos eran naranjas y la otra mitad negros. El estudiante tiene dos vecinos, uno tiene un gato negro llamado Ninja y el otro un gato naranja llamado Kiro. Ambos vecinos aseguran que su gato es el padre de los gatitos y por eso se merecen tenerlos. Con base en la información del color del gato: a) Identifique al gato progenitor macho de la camada. b) Realizar el cruzamiento parental e identificar las proporciones genotípicas y fenotípicas de la progenie. c) Desarrollar la historia en forma de historieta y aportar un desenlace.

Situación problemática 2: Katy entró en celo y se apareó con una gata negra llamada Ninja. De la cruce entre los dos gatos se obtuvo una camada formada por un gato negro llamado Zeus y dos gatos calicó llamados Afrodita y Atenea. Atenea presenta un comportamiento extraño cada vez que ve a otro gato amarillo macho (llamado Kiro) y pelea con él. Después de meses, Afrodita entra en celo y, para sorpresa de la estudiante, ella y Atenea se aparearon entre sí. En este punto, el estudiante decide hacer un cariotipo para cada uno de estos gatos y descubre que Afrodita en su cariotipo tiene tres cromosomas X, en lugar de dos (XXX), que Atenea es en realidad "Ateneo" ya que tiene un cromosoma Y extra (XXY), y finalmente decide cambiar el nombre de Zeus por el de Medusa ya que es del sexo femenino, aunque solo tiene un cromosoma X (X0). La pregunta que hicimos a los estudiantes fue: ¿Cuál es la explicación genética de lo sucedido? Les solicitamos a los estudiantes que dieran una posible explicación y solución a esta situación a través de una historieta o cómic de la longitud que ellos desearan.

Variantes al rol de profesor

Dentro de la secuencia didáctica planteada, también se consideró el asignar variables al rol de profesor entre los propios estudiantes. Esto se logró al plantear una actividad en la que se identificara a los estudiantes que presentaron problemas en la resolución de los ejercicios abordados en la secuencia didáctica, para que fueran asesorados por otros tres de sus compañeros y que asumieron el rol del profesor. En este sentido, los alumnos tuvieron la función de aclarar las dudas que tuviera su compañero, para que, posteriormente, éste pasara frente a los profesores de la asignatura y diera la explicación del o los ejercicios en los que originalmente tuvo problemas.

Criterios de evaluación

Cabe mencionar que las evaluaciones son para conocer qué tan bien funciona el ejercicio y no a los estudiantes. Es decir, conocer si los estudiantes eran capaces de ligar la meiosis a partir de la cual se generan las gametas con las probabilidades de los genotipos y fenotipos esperados en la descendencia. También si pudimos transmitir lo que significa la no disyunción de los cromosomas sexuales y lo que implica en la descendencia de un determinado cruce.

En esta serie de situaciones problemáticas en algunos casos se omitió el hecho de que existe una inactivación al azar de uno de los cromosomas "X" en las hembras, lo cual da como resultado en las hembras heterocigotas para el alelo que codifica el color del pelaje que las hembras tengan el pelaje negro ó anaranjado, dependiendo del clon celular del cual parte la célula que dio origen al color del pelaje en un área determinada del cuerpo de la gata en cuestión. También es importante mencionar que en la segunda situación problemática esperábamos que los estudiantes llevarán la aplicación de sus conocimientos a tal grado a partir del análisis pudiesen concretar la idea de que durante la meiosis de uno de los progenitores existió un error celular que condujo a la no disyunción de los cromosomas de tal forma que "Ateneo" tenía un cromosoma sexual extra.

Para ambas situaciones se valoró el uso y definición o explicación de 10 conceptos básicos de la genética para resolver este tipo de problemas (visto en clase, ver Tabla 1). La puntuación se dio de la siguiente manera: la mención del concepto implica un punto, mientras que la ausencia del mismo se cuantificó con cero puntos. Asimismo, la definición correcta obtuvo un punto, mientras que la falta de definición se consideró como cero puntos.

Consentimiento informado

A todos los participantes se les pidió que dieran su consentimiento informado explicando el propósito de la práctica, dar a conocer los resultados de los ejercicios y el permiso para usar sus imágenes en este trabajo.

Tipo de análisis

En este estudio el tipo de estudio fue cualitativo. Se buscó a) la aparición de una serie de palabras en las historietas, b) el uso adecuado de los conceptos en el contexto de la historieta en donde: se asignó un 1 al uso adecuado del concepto y un cero al no uso del concepto o al mal uso del mismo. Se organizaron planillas de datos en Libre Office y se utilizó la frecuencia de uso de las palabras en el total de las presentaciones.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos corresponden al análisis de historietas generadas por un total de cuarenta y cuatro (44) participaciones, de las cuales cuarenta y dos (42) fueron producciones individuales. Para algunos estudiantes la asignación les resultó muy difícil por lo que solicitaron llevarla a cabo por parejas (2). En la Figura 1, se ejemplifican algunos de los errores observados en las historietas, mientras que el uso de los conceptos se resume en la Tabla 1. Siete presentaciones (16%) mostraron un razonamiento ordenado. En tres presentaciones no se presentó historieta y solo se colocó un cuadrado de Punnett como respuesta. En un caso se presentó una historieta basada en casos humanos utilizando la información que ofrece el problema para gatos. En todos los casos en que se utilizó la nomenclatura de letras o símbolos para identificar los alelos, los estudiantes nunca explicaron lo que representaba la nomenclatura, no hicieron explícito el que los genes se encuentran en los cromosomas y específicamente que se trataba de herencia ligada al cromosoma X.

En lugar de denotar al alelo como el portador de la información genética que lleva a expresar un fenotipo, en este caso el color del pelaje de los gatos, se identificó al alelo como el color mismo e incluso en los casos en que se dibujaron los cromosomas, los cromosomas se pintaban con el color del alelo que portaba, es decir, el cromosoma o el alelo eran los "colores".

Los estudiantes no mostraron el poder asociar el proceso de meiosis a través del cual se generaron gametas con cromosomas sexuales de más, con el cuadrado de Punnett que predice las proporciones genotípicas y fenotípicas en la descendencia, de tal forma que la representación del cuadrado podía estar bien, pero las gametas se habían producido de una forma misteriosa para el estudiante, no ligando la meiosis con la generación de las gametas. Como se puede observar en la Tabla 1, nunca mencionaron la palabra "meiosis", "meiosis I", "meiosis II" ó la frase "no disyunción de los cromosomas sexuales". Tampoco realizaron un esquema del proceso de meiosis que podría haber generado el tipo de gametas representada a través de símbolos en sus cuadrados de Punnett. Aunque si mencionaron la frase "cromosomas sexuales" (lo mencionan el 41%), no se refirieron al tipo de herencia (Herencia ligada al sexo) ni a las diferencias entre este tipo de herencia y la herencia en los autosomas. No observamos que hicieran uso de la representación de árboles genealógicos para explicar las situaciones familiares de los gatos.

Cuando los estudiantes resolvieron la situación problemática 2 (Tabla 1 y Figura 3), aunque mencionan la palabra "cariotipo" (16%), solamente el nueve por ciento lo define. Se observa que no llegan a hacer una correlación entre lo que es un cariotipo, cómo se obtiene y la alteración del mismo a partir de un error en la meiosis que conduce a una segregación inadecuada de los cromosomas sexuales. También se menciona el "corpúsculo de Barr", en el 32 % de las historietas derivadas de las situación problemática 2, aunque no se menciona cómo se genera o qué significa tener más de un corpúsculo de Barr. Ninguna historieta definió lo que es "determinación del sexo".

Tabla 1. Análisis de conceptos en las historietas

Concepto	Frecuencia de uso	% (del total)	Concepto definido	% (del total)
alelo	16	36	1	2
fenotipo	4	9	0	0
genotipo	7	16	1	2
Cromosomas sexuales	18	41	3	7
cariotipo	7	16	4	9
heterocigoto	5	11	0	0
cuadrado de Punnett	35	80	4	9
Corpúsculo de Barr	14	32	6	14
Determinación del sexo	8	18		
Dibujo de los cromosomas sexuales	11	25		

En la mayoría de las historietas presentadas, hay una marcada tendencia a usar el cuadrado de Punnett (80% de los estudiantes), infortunadamente de forma inconexa con el significado biológico de la formación de gametas durante la meiosis, la fecundación y la probable progenie en términos de genotipos y fenotipos. A partir de la Tabla 1, las Figuras 2 y 3, corroboramos que los alumnos resolvían los ejercicios básicamente acordes al cuadrado de Punnett, aunque si hacían mención de conceptos explicados durante el curso de Genética.

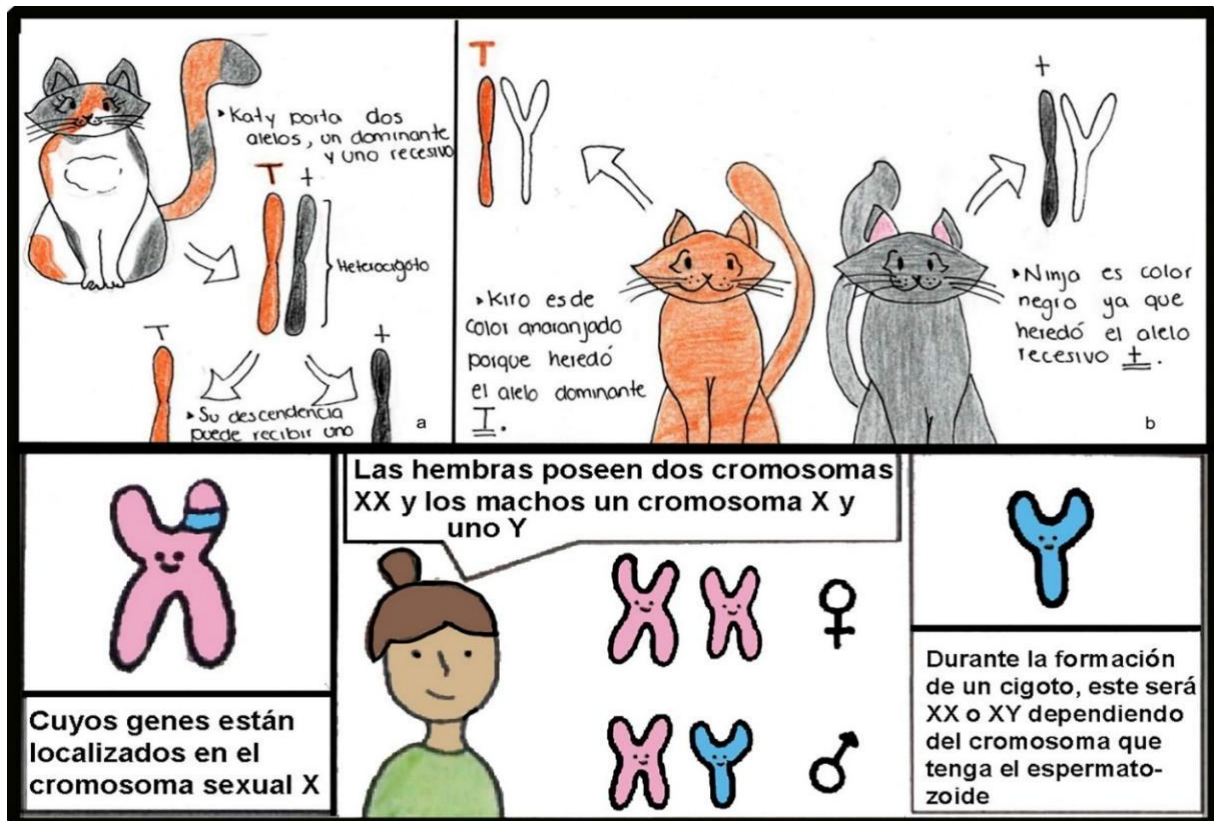


Fig. 2. Ejemplos de errores conceptuales en las historietas a partir de la "situación problemática 1", como: a-b) confusión entre alelos y cromosomas, c) ausencia de genes en las cromátides, y d) forma del cromosoma Y.

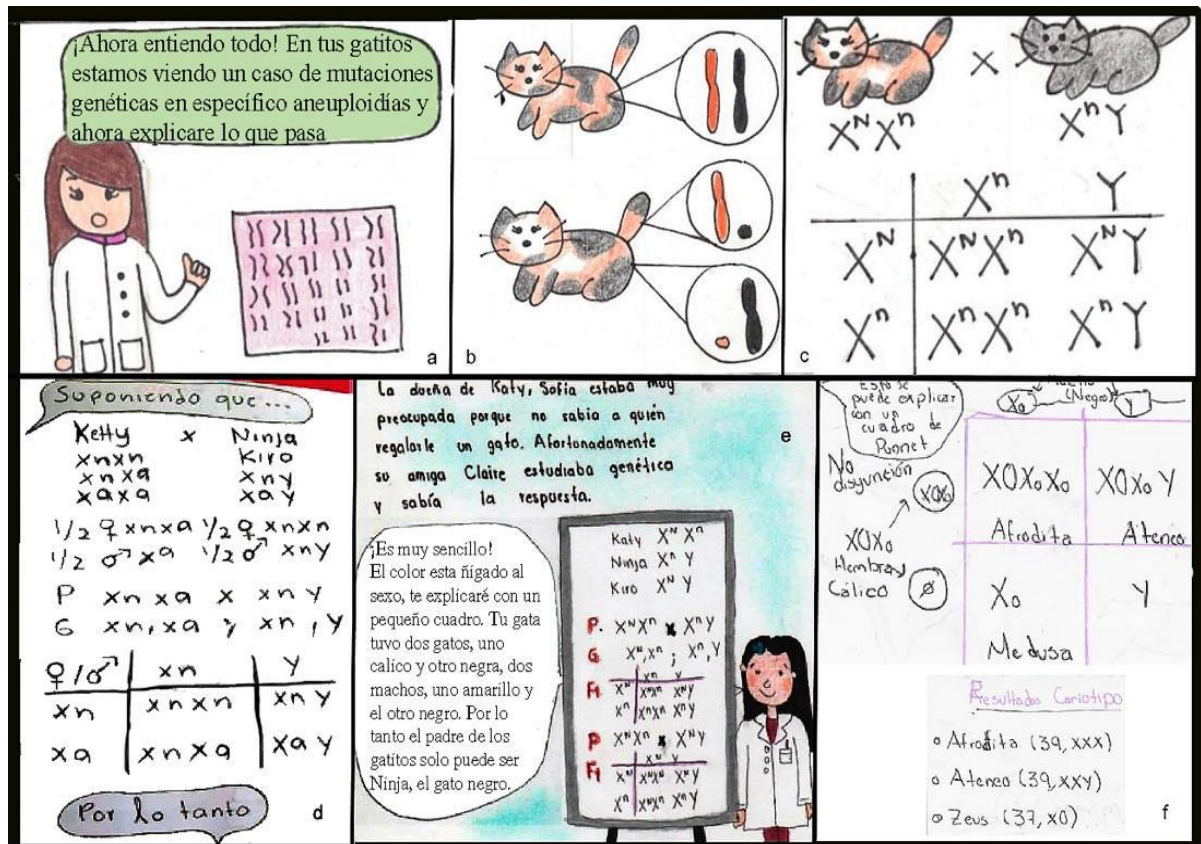


Fig. 3. Ejemplos errores conceptuales en las historietas a partir de la "situación problemática 2", como: a) cariotipos erróneos en organismos, b) ausencia del Corpúsculo de Barr, y c - f) errores en el cuadrado de Punnett.

DISCUSIÓN

Volviendo al contexto histórico del que surgió la separación de las escuelas, la forma de interpretar los resultados de los cruces en genética ya sea desde el punto de vista biológico o desde el punto de vista matemático, no hemos encontrado un libro de texto que conlleve un resumen del pensamiento de ambas escuelas de manera armoniosa y a partir del cual los alumnos se den cuenta de que las letras que representan los alelos en el cuadrado de Punnett representan en realidad los alelos (secuencias de DNA para un gen) dentro de los cromosomas, que a su vez se encuentran en los núcleos celulares de los gametos que los portan, con la fusión de los gametos femenino y masculino se restaura la diploidía y produce una progenie con un determinado genotipo y fenotipo.

En este trabajo se demuestra que la resolución de problemas se puede realizar de forma mecánica y que no desarrolla plenamente las capacidades intelectuales. Ninguno de los estudiantes planteó una hipótesis de trabajo o una metodología para resolver los problemas, es decir, con ninguno de los dos problemas fue posible estimular la comunicación de la actividad científica del laboratorio a través de una historieta. De los trabajos evaluados se desprende que no es necesario que los alumnos tengan conocimientos de las palabras íntimamente ligadas a la genética o conocimiento de cómo se producen los gametos para resolver los problemas.

Las dificultades a las que se enfrentan los estudiantes para adquirir conocimientos han sido descritas en numerosos trabajos. Los conceptos genéticos son amplios y difíciles de asimilar (Meyer y Land, 2006) y los estudiantes los comprenden poco (Richards y Ponder, 1996). Según Batzli *et al.* (2014), la enseñanza de la genética en los cursos introductorios se limita a los temas de meiosis y el análisis de caracteres discretos con herencia mendeliana a través de cuadrados de Punnett. Sin embargo, ambos temas están mal vinculados por los docentes. Debido a esto, algunos autores (Dougherty, 2009; Redfield, 2012) proponen la reformulación del temario de Genética y consideran como tema de investigación las dificultades y malas interpretaciones de estos conceptos (Gusmalini *et al.*, 2020).

Los resultados obtenidos en nuestra investigación están en línea con los descritos anteriormente. En nuestro caso, los alumnos tuvieron total libertad para explicar sus resultados utilizando los conceptos de genética y proponer soluciones. Sin embargo, se puede observar que la palabra "alelo" se usó solo en el 36% de las presentaciones, es decir, que las personas que dibujaron las historietas o dieron por sentado qué es un alelo y su función o no lo sabían, y de los que lo usaron, sólo una historieta explicó el concepto. Si bien se aclaró que las historietas debían estar dirigidos a personas que no sabían nada de genética, obviamente los estudiantes no podían dejar de lado sus situaciones de aprendizaje y escribieron sus respuestas como si estuvieran haciendo una presentación en clase. Casi no se usaba la palabra "fenotipo", aunque lo que se analizaba era precisamente el fenotipo (color) de los gatos. La palabra "genotipo" se usó casi el doble de veces (16% de genotipo y 9% de fenotipo).

El color del pelaje de los gatos está mediada por genes que se ubican en el cromosoma X del par de cromosomas sexuales. Si bien esto es fundamental para poder explicar los resultados, menos de la mitad de las presentaciones realizadas por los estudiantes utilizaron el concepto de cromosomas sexuales (41%), y sólo el 7% de las mismas, dieron una explicación correcta. En este contexto y a pesar de que se trata de un fenotipo determinado por la heterocromatización aleatoria de uno de los cromosomas X, sólo el 32% utilizó el concepto de cuerpo de Barr y sólo el 14% explicó qué es y su origen. La palabra heterocromatina o conceptos derivados de ella no fueron citados en ninguna presentación.

El hecho de que los alumnos no dejaran de lado el ambiente del aula, es decir, personas que estuviesen cursando la asignatura de Genética, siguieran construyendo sus respuestas a partir del lenguaje matemático más sencillo de captar a diferencia de lo que sería asociar el proceso biológico de formación de gametas y generación de progenie a través de la fecundación; se demuestra con el uso del cuadrado de Punnett en el 80% de las presentaciones, en general, antes de iniciar la historieta o en medio de la historieta, para explicar los resultados de forma totalmente desconectada con el desarrollo de la cruce, por ejemplo, sin explicar de dónde procedían los gametos femeninos y masculinos, ni en qué proporciones aparecían o probabilidad de generación de cada uno de los gametos. De las presentaciones se desprende que fue necesario dejar el cuadrado de Punnett al inicio para poder iniciar la historieta, a tal grado de reduccionismo que, en tres presentaciones se limitaron a exhibir únicamente el cuadrado de Punnett como toda explicación de los resultados.

En las historietas en las que los estudiantes dibujaron cromosomas (25%), solo un estudiante dibujó los cromosomas correctamente, mientras que hubo representaciones en las que se dibujó el cromosoma sexual "Y" como la letra que lo identifica, tal como aparece en varias publicaciones en línea. Este error conceptual ya había sido señalado por nuestro equipo de trabajo (Rodríguez-Gil *et al.*, 2018).

Puede haber varias razones para explicar estos resultados, incluida la complejidad de los conceptos genéticos, las interpretaciones alternativas, los diferentes tipos de conocimiento, los modos de razonamiento de los estudiantes, las estrategias de enseñanza y los libros de texto. Los libros de texto, en particular, son materiales curriculares destacados porque median en la construcción del conocimiento, pero también pueden ser fuente de malentendidos entre los estudiantes (Rodríguez-Gil *et al.*, 2018). En la universidad, la meiosis y la herencia genética a menudo se analizan como dos áreas de contenido distintas (Strand y Boes, 2019). Si bien el trabajo de Mendel es de suma importancia histórica y los problemas de trabajo centrados en rasgos discretos tienen relevancia clásica, los temarios tradicionales de genética deben actualizarse y deben reflejar el trabajo y los problemas que emprenden los genetistas del siglo XXI (Batzli *et al.*, 2014; Rodríguez-Gil *et al.*, 2018). Los resultados de esta investigación muestran que los estudiantes llegan al aula con ideas previas de distinta profundidad o alcance que se hacen perceptibles cuando se evalúan de forma no tradicional, y tales ideas previas ya han sido abordadas en otros trabajos desde otras perspectivas (Ayuso y Banet, 2002; Lewis *et al.*, 2000).

Una posible solución a la enseñanza e integración de ambos temas (meiosis y mendelismo) fue propuesta por Dougherty (2009) y Redfield (2012), quienes propusieron invertir el temario de genética, de modo que el enfoque histórico de la enseñanza de la meiosis y la herencia de los rasgos mendelianos de un solo gen se invierte y el plan de estudios comienza con la herencia y la expresión de rasgos continuos reconocibles, medibles y comunes (genética cuantitativa y de poblaciones). En otras palabras, un nuevo plan de estudios podría generar preguntas e investigaciones sobre genética cuantitativa e integrar la genética mendeliana en el camino. Además, la incorporación de conceptos, lenguaje y mecanismos de evolución dentro de una unidad de genética integradora como la que se presenta aquí crea una transición curricular fluida desde la herencia genética hasta las complejidades inherentes a la enseñanza y el aprendizaje de la genética y la evolución, como el que proponemos y se puede consultar en Rodríguez-Gil *et al.* (2023).

En línea con lo que Posner *et al.* (1982) proponen, nuestra posición es que la enseñanza de la genética, en este cambio conceptual debe proponer que los estudiantes aporten al aula sus conocimientos previos y su familiaridad con los conceptos y el lenguaje, sentando las bases para captar nuevos conceptos, reemplazando, reorganizando y revisando la comprensión y la construcción de nuevos conocimientos. Este cambio eliminaría las barreras conceptuales, como sugieren Meyer y Land (2003). Los conceptos con los que uno ingresa al aula son específicos del dominio, pero amplios y, a menudo, difíciles de entender, pero cuando se entienden, funcionan como puertas de entrada o portales para una comprensión más profunda y holística de toda una red de conceptos dentro de la disciplina.

Esta barrera ya fue detectada en el nivel educativo secundario por Gusmalini *et al.* (2020), quienes estudiaron las dificultades que existían en la comprensión de la genética a partir de las concepciones erróneas de los estudiantes sobre el concepto de genética. Estos conceptos erróneos se encuentran en el significado y alcance de la genética, material genético (genes, DNA y cromosomas), relaciones gen-DNA-cromosoma, procesos de síntesis de proteínas, principios de herencia, mecanismos de herencia, determinación del sexo, relación meiótica y división de la meiosis. con herencia y mutaciones (Suhermiati, 2015). Estos errores conceptuales relacionados con el concepto de gen y sus implicaciones para la enseñanza de las ciencias y la biología han sido abordados (Gericke y Hagberg, 2010). Estos artículos argumentan que una fuente importante de dificultad para fomentar la comprensión de la genética por parte de los estudiantes radica en la presentación de modelos sobre los genes y su papel en los sistemas vivos, de una manera inconsistente y en gran medida ahistórica, como si constituyeran un conjunto de desarrollos lineales y coherentes en lugar de una diversidad de modelos diferentes, contruidos para diferentes propósitos y utilizados en contextos específicos.

La leyes de Mendel son un tema nodal en la Biología, a partir de la probabilidad de fecundación entre gametas, se plantean diferentes posturas Evolutivas, como así también se diseñan planes de mejoramiento genético dirigido para beneficio humano o bien para analizar impactos ambientales a partir del desequilibrio de Hardy-Weinberg en las frecuencias alélicas o genotípicas. Todo este armado se sostiene en un ciclo celular denominado Meiosis, es decir sin meiosis no habría Teoría de Mendel. Como se describió en Rodríguez Gil *et al.*, 2018, la Meiosis tiene serios errores conceptuales en el marco de lo que refiere a la enseñanza (en cualquiera de sus niveles). En aquel trabajo se señalaron los errores que existen en las imágenes que se utilizan para comunicar los diferentes estadios, sumados a errores conceptuales que existen en los textos. Ese error se vuelve a poner en evidencia en este trabajo, que desde otra experiencia muestra el insuficiente dominio de los conceptos que tienen los estudiantes. Esta insuficiencia se podría atribuir a la parte docente, esta hipótesis debería ser rechazada a partir de los resultados de este trabajo debido a que: 1) se tomaron en dos países diferentes, en dos universidades diferentes con distinta forma de seleccionar perfiles docentes; 2) la dinámica utilizada en ambas universidades fue diferente (en una se incluyó ambos temas separados por semanas dentro de la misma asignatura, mientras que en la otra los temas se abordaron desde dos materias diferentes)

CONCLUSIONES

De acuerdo al trabajo presentado y a los resultados obtenidos, se pueden plantear las siguientes tres conclusiones principales:

- 1.- Existe un desfase conceptual entre el proceso de meiosis y la explicación matemática del cuadrado de Punnett para resolución de ejercicios de Genética que implican cruces genéticos. Es decir, el estudiantado puede plantear cruces genéticos sin plantearse o tener en mente el proceso biológico de cómo se generan las gametas de los progenitores.
- 2.- La forma inconexa en la que se ven los temas de meiosis y probabilidad en Genética, coadyuban a que el alumno no pueda interpretar la resolución de un problema a partir de la meiosis ni pueda relacionar este proceso de generación de gametas con las probabilidades de generación de las mismas. En múltiples casos estos temas se ven en módulos independientes, acentuando así la percepción de que no existe una relación entre ambos.
- 3.- Será conveniente enseñar el tema de meiosis y probabilidad de una forma conjunta e interrelacionada. Consideramos necesario el desarrollo de una metodología para que el estudiantado pueda incorporar el proceso biológico de la formación de los gametos con los resultados genéticos en cruces genéticos (cuadrado de Punnett), de tal forma que ambos conocimientos se conjunten de una forma integral que beneficie la adquisición de ambos tipos de conocimiento por parte del estudiantado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los ex-alumnos Odette Mariel López Rosas e Iván Meneses Alvarado por la realización de la ilustración que se encuentra en la situación problemática I, que se encuentra en el Repositorio de SEDICI (Rodríguez-Gil *et al.*, 2023); y a las alumnas y alumnos que participaron en la realización de las actividades descritas en el presente trabajo.

REFERENCIAS

- Ayuso, G.E., y Banet, E., "Pienso más como Lamarck que como Darwin" comprender la herencia biológica para entender la evolución, *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, ISSN 1133 9837, 32(3), 39-47 (2002)
- Batzli, J.M., Smith, A.R., y otros cuatro autores, Beyond Punnett Squares: Student word association and explanations of phenotypic variation through an integrative quantitative genetics unit investigating anthocyanin inheritance and expression in *Brassica rapa* Fast plants, <https://doi.org/10.1187/cbe.13-12-0232>, *CBE Life Sci. Educ.*, 13, 410–424 (2014)
- Bierema, A.M.K., y Schwartz, R.S., Learning from the Fruitfly: A Card Game for Teaching Mendel's Laws, Meiosis, Punnett Squares, https://doi.org/10.2505/4/tst16_083_08_39, *Science teacher (Normal, Ill.)*, 83(8), 39 (2016)
- Boveri, T., Über mehrpolige Mitosen als Mittel zur Analyse des Zellkerns, 67-90, *Verh. Phys. Med. Ges Würzburg.*, N.F., 35 (1902).
- Brush, S.G., How Theories became Knowledge: Morgan's Chromosome Theory of Heredity in America and Britain, <https://doi.org/10.1023/a:1021175231599>, *J. Hist. Biol.*, 35, 471–535 (2002)
- Caballero-Armenta, M., Algunas ideas del alumnado de secundaria sobre conceptos básicos de genética, ISSN 0212 4521, *Enseñanza de las Ciencias*, 26(2), 227–243 (2008)
- Coleman, W., Bateson and Chromosome: conservative thought in science, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0498.1971.tb00160.x>, *Centaurus*, 15, 228-314 (1970)
- Díaz, C., Reyes, M., y Bustamante, K., Planificación educativa como herramienta fundamental para una educación con calidad, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3907048>, *Utopía Y Praxis Latinoamericana*, 25(Esp.3), 87-95 (2020)
- Dietrich, M.R., Richard Goldschmidt's "Heresies" and the Evolutionary Synthesis, <https://doi.org/10.1007/BF01059388>, *J. Hist. Biol.*, 28(3), 431-461 (1995)
- Dougherty, M.J., Closing the Gap: Inverting the Genetics Curriculum to Ensure an Informed Public, <https://doi.org/10.1016/j.ajhg.2009.05.010>, *Am. J. Hum. Genet.*, 85(1), 6-12 (2009)
- Erazo-Moreno, M.M., Colichon-Chiscul, M.E., Nina-Cuchillo, J., y Cubas-Irigoin, N., Competencias emocionales y aprendizaje cooperativo de estudiantes universitarios en el contexto de la educación en línea, <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-50062023000300011>, *Form. Univ.*, 16(3), 11-20 (2023)
- Facultad de Ciencias, Plan de Estudios 1997 de la Carrera de Biología, Asignatura de Genética I <https://www.fciencias.unam.mx/sites/default/files/temario/1404.pdf> (2023)
- Gericke, N.M., y Hagberg, M., Conceptual incoherence as a result of the use of multiple historical models in school textbooks, <http://dx.doi.org/10.1007/s11165-009-9136-y>, *Res. Sci. Educ.*, 40(4), 605–623 (2010)
- Gusmalini, A., y Wulandari, S., Identification of Misconceptions and Causes of Student Misconceptions on Genetics Concept with CRI Method, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012053>, *JPCS*, 1655, 012053 (2020)

- Kalas, P., O'Neill, A., Pollock, C., y Birol, G., Development of a meiosis concept inventory, <https://doi.org/10.1187/cbe.12-10-0174>, CBE Life Sci. Educ., 12(4), 655-664 (2013)
- Lewis, J., Leach, J., y Wood-Robinson, C., Chromosomes: The missing link - young people's understanding of mitosis, meiosis and fertilization, <https://doi.org/10.1080/00219266.2000.9655717>, J. Biol. Educ., 34(4), 189-199 (2000)
- Martins, L.A.C.P., The dissemination of the chromosome theory of Mendelian heredity by Morgan and his collaborators around 1915: a case study on the distortion of science by scientists, ISSN 1983-053X, Fil. Hist. Biol., 5(2), 327-367 (2010)
- Meyer, J., y Land, R., Threshold Concepts and Troublesome Knowledge: Linkages to Ways of Thinking and Practicing within the Disciplines, in ISL10 Improving Students Learning: Theory and Practice Ten Years On, 412-424, Oxford Brookes University, ISBN: 1-873576-68-2, Headington, Oxford, UK (2003)
- Morgan, T.H., Sturtevant, A.H., Müller, H.J., y Bridges, C.B., The Mechanism of Mendelian Heredity, <https://doi.org/10.1126/science.44.1137.536>, Henry Holt and Company, New York (1915)
- Posner, G.J., Strike, K.A., Hewson, P.W., y Gertzog, W.A., Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change, <https://doi.org/10.1002/sce.3730660207>, Sci. Educ., 66, 211-227 (1982)
- Redfield, R.J., "Why Do We Have to Learn This Stuff?"-A New Genetics for 21st Century Students, <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001356>, PLoS Biol., 10(7), e1001356 (2012)
- Rheinberger, H.J., Carl Correns' experiments with pismus, 1896-1899, En Reworking the Bench, Archimedes, 7, 221-252, ISBN: 978-1-4020-1039-2, Springer, Dordrecht (2003)
- Richards, M.P., y Ponder, M., Lay understanding of genetics: A test of hypothesis, <https://doi.org/10.1136/jmg.33.12.1032>, J. Med. Genet., 33(12), 1032-1036 (1996)
- Rodríguez-Gil, S.G., Fradkin, M., y Castañeda-Sortibrán, A.N., Conceptions of meiosis: misunderstandings among university students and errors, <https://doi.org/10.1080/00219266.2018.1469531>, J. Biol. Educ., 53, 191-204 (2018)
- Rodríguez-Gil, S.G., Carballo-Ontiveros, M.A., Castañeda Sortibrán, A.N., Repositorio Servicio de Difusión de la Creación Intelectual (SEDICI), <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/158094> (2023)
- Rushton, A.R., Cambridge geneticists and the chromosome theory of inheritance: William Bateson, Leonard Doncaster and Reginald Punnett 1879-1940, <https://doi.org/10.1080/00033790.2022.2113141>, Ann. Sci., 79(4), 468-496 (2022)
- Stevens, N., A study of the germ cells of *Aphis rosae* and *Aphis oenotherae*, <https://doi.org/10.1002/jez.1400020302>, J. Exp. Zool., 2(3), 313-333 (1905)
- Strand, S., y Boes, K.E., Drawing a Link Between Genetic Inheritance and Meiosis: A Set of Exercises for the Undergraduate Biology Classroom, <https://doi.org/10.1128/jmbe.v20i2.1733>, J. Microbiol. Biol. Educ., 20(2), 60 (2019)
- Sturtevant, A.H., A History of Genetics, <https://doi.org/10.1126/science.152.3724.922.a>, Harper & Row, New York (1965).
- Suhermiati, I., Indana, S., y Rahayu, Y.S., Analysis of students misconception in protein synthesis subject material based on biology student learning result, Jurnal Ilmiah Pendidikan Biologi, ISSN 2302 9528, 4(3), 985-990 (2015)
- Sutton, W.S., On the Morphology of the Chromosome Group in *Brachystola magna*, <https://doi.org/10.1007/s12045-009-0041-5>, Reson., 14, 398-411 (2009)
- Van Balen, G., Conceptual Tensions Between Theory and Program: The Chromosome Theory and the Mendelian Research Program, <https://doi.org/10.1007/BF00127700>, Biol. Philos., 2, 435-461 (1987)
- Universidad Complutense de Madrid (UCM), Tema de Meiosis, <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-56185/16-La%20Meiosis.pdf> (2023)
- Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), Carrera de Agrobiotecnología, Materias, https://www.unsam.edu.ar/oferta/carreras/agrobiotecnologia_materias.pdf (2023)
- Wikipedia, Tema Leyes de Mendel, https://es.wikipedia.org/wiki/Leyes_de_Mendel (2023)
- Wynne, C.F., Stewart, J., y Passmore, C., High school students' use of meiosis when solving genetics problems, <https://doi.org/10.1080/095006901750162856>, Int. J. Sci. Educ., 23(5), 501-515 (2001)