

Expresión de la información genética en la anemia falciforme: Diseño y aplicación de una propuesta de secuencia de enseñanza y aprendizaje basada en la indagación científica

Brayan Castillo Castillo

Universidad de La Serena
brayancastillomar@gmail.com

Resumen

Este estudio investigó el aprendizaje sobre expresión genética en estudiantes de 3° medio de un colegio en La Serena, Chile, utilizando una secuencia de enseñanza basada en indagación científica. Se analizaron las respuestas a guías de actividades de biología celular y molecular, codificándolas para evaluar progresión y comprensión conceptual. El diseño de la secuencia se fundamentó en el currículum de biología y revisión de textos y literatura sobre concepciones alternativas de expresión genética. La implementación destacó cómo los estudiantes relacionan la genética con enfermedades hereditarias, basándose en criterios como el origen y la mutación molecular afectante. La pandemia de COVID-19 obligó a realizar el curso en línea, lo que representó una limitación. Los hallazgos sugieren mejoras en las actividades de enseñanza para fomentar habilidades y actitudes científicas, así como la adquisición de conocimientos.

Palabras clave: Anemia falciforme, Expresión Genética, Indagación Científica, Secuencia de Enseñanza Aprendizaje.

Introducción

Jalmo y Suwandi (2018), señalan que la genética ha progresado de manera acelerada desde el siglo XX hasta nuestros días, lo cual, ha sido un desafío para las nuevas generaciones, debido a que se han desarrollado una serie de productos y nuevas tecnologías en base a la genética, lo cual requiere que la población se alfabetice científicamente en relación a esta temática. Boerwinkel, Yarden, y Waarlo (2017), señalan que para que las personas tomen decisiones sobre cuestiones relacionadas con la genética, como, por ejemplo, en el área de la salud, para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades o el desarrollo de medicamentos, deben estar alfabetizadas genéticamente.

El problema de la enseñanza del contenido de expresión de la información genética, radica en que se enseña mediante imágenes, dibujos, esquemas, fotos y gráficos, dado que estos permiten mostrar estructuras y/o procesos que no se pueden observar a simple vista, ya que, son procesos que ocurren en el interior de las células (Rosenberg, 2014); a esto se suma, que muchas veces los docentes enseñan estos contenidos mediante clases expositivas y utilizando esquemas con lenguaje simbólico, en los cuales hay siglas y flechas para guiar y ejemplificar los procesos celulares; muchas veces los estudiantes memorizan lo que el docente les explica o enseña, pero no lo logran comprender o aplicar en algún contexto de su vida o en la sociedad. Chattopadhyay (2005), señala que el aprendizaje de genética no se debe fundamentar en la memorización de los contenidos, sino que estos deben ser comprendidos y asimilados para que sean relacionados con la vida cotidiana o con hechos reales.

Para tener un punto de partida sobre la enseñanza de esta temática, se identificaron las concepciones alternativas que poseían los estudiantes en relación a esta temática, según lo que señalaba la literatura, y se determinó que la gran mayoría de los alumnos hacen referencia a los niveles de organización molecular, celular y la expresión de la información contenida en los genes, y no saben diferenciar entre ADN y ARN. Además, que los estudiantes no saben cómo se organiza el material genético, es decir, que el ADN está formado por genes, los cuales son segmentos de este, y que los cromosomas son ADN condensado, y señalan solamente que estos se encuentran en las células.

La razón de conocer las concepciones alternativas que tienen los estudiantes en torno a una temática específica, permitirá poder diseñar una secuencia didáctica sobre expresión de la información genética y poder tratarla desde diferentes perspectivas, considerando actividades que permitan desarrollando habilidades y actitudes científicas, y que a la vez contribuyan a modificar o cambiar las concepciones alternativas que tienen los estudiantes.

La importancia de que los estudiantes aprendan sobre expresión de la información genética en la nueva asignatura de Biología Celular y Molecular de 3° y 4° medio, es que ellos *“profundicen en los procesos que permiten la expresión genética para poder relacionar los genes con el ADN, la síntesis de ARN y producción de proteínas (...)”* (Ministerio de Educación, 2020a, p. 76). El contenido de expresión de la información genética, es un contenido fundamental, pero a la vez muy difícil de enseñar, ya que, como nos señala Rosenberg (2014), son contenidos que se pueden catalogar como complejos y abstractos, para los cuales el alumnado presenta dificultades para entenderlos y aplicarlos (Venville y Dawson, 2010, citado en Ageitos y Puig, 2016).

Dado todos estos antecedentes, se decidió confeccionar una secuencia didáctica o una secuencia de enseñanza aprendizaje (SEA) con foco en la indagación científica sobre el contenidos de expresión de la información genética, la cual permita abordar el objetivo de aprendizaje de *“Analizar críticamente el significado biológico del dogma central de la biología molecular en relación al flujo de la información genética en células desde el ADN al ARN y a las proteínas”*, y una vez aplicada esta SEA, se pretende explorar los aprendizajes sobre esta temática alcanzados por estudiantes de 3° medio del electivo de biología celular y molecular de un Colegio Particular Subvencionado (Corporación Educacional), de la ciudad de La Serena, Región de Coquimbo, Chile.

Marco de referencia

Noción científica

El contenido de expresión de la información genética, es catalogado como un contenido fundamental para entender los procesos que ocurren a nivel tanto del genotipo (genes) como del fenotipo (expresión de los genes más el ambiente). De acuerdo a Ayuso y Banet (2002), el interés por la enseñanza de la genética se debe a que se busca brindar a los estudiantes conceptos sobre transmisión de la información genética, para poder comprender procesos biológicos importantes; además de permitir que los integrantes de la sociedad estén informados y comprendan las repercusiones de la genética en la tecnología y en la sociedad; como, por ejemplo, que conozcan estudios científicos de avances en esta área, las causas de

algunas enfermedades, o cualquier proceso relacionado con la biotecnología, por lo que sugieren abordar estos temas en el aula y relacionarlos con el currículo.

La importancia que tiene la genética, puede abarcar diferentes aspectos, desde la medicina, para el diagnóstico y tratamiento de diferentes enfermedades, pasando por la agricultura en el mejoramiento de especies para que tengan una mayor producción, sean resistentes a plagas, y a los cambios climáticos, la ganadería, donde se manipulan las especies, para obtener algunas con caracteres deseados, mayor producción de carne y menos grasa, y crecimiento más rápido de estas. Además, lo más importante, alfabetizar científicamente a los individuos de la sociedad, es decir, que sepan sobre genética para poder aplicarlo en su vida, como por ejemplo al momento de escuchar o leer una noticia sobre esta temática, y poder entender de qué se trata; al leer el mecanismo de acción de algún medicamento, y entender cómo va actuar en nuestro cuerpo, o bien saber genética permitirá comprender por qué tenemos determinadas características, tales como color de ojos, de pelo, la estatura, etc.

Revisión del Currículum

En esta secuencia de enseñanza aprendizaje, se tratará el tema de la enseñanza y aprendizaje de la expresión de la información genética, para lo cual se realizó una revisión de los programas de estudio de ciencias naturales eje de Biología de enseñanza media, para así identificar en qué curso se enseña esta temática. Al revisar estos programas, nos podemos dar cuenta que el contenido de genética (más adelante lo enfocaremos en la expresión de la información genética) se trata en 2° medio y en 4° medio (hasta 2019). Resumen de esta revisión presentado en la tabla 1.

Tabla 1. Unidades de la asignatura de Biología en enseñanza media (Fuente: MINEDUC, 2016, 2017 y 2018).

Curso	Año de publicación del programa de estudio	Unidades
1° medio	2017	<ul style="list-style-type: none"> • Evolución y biodiversidad. • Organismos en ecosistemas. • Materia y energía en ecosistema. • Impactos en ecosistema y sustentabilidad.
2° medio	2018	<ul style="list-style-type: none"> • Coordinación y regulación. • Sexualidad y reproducción. • Genética. • Manipulación genética.
3° medio	2016*	<ul style="list-style-type: none"> • Homeostasis y regulación interna. • Sistema nervioso. • Respuesta nerviosa. • Evolución.
4° medio	2016*	<ul style="list-style-type: none"> • Expresión y manipulación del material genético. • Sistema inmune: estructura y función. • Sistema inmune: enfermedades y tratamientos. • Problemáticas ambientales.

*Estos programas de estudio tuvieron vigencia hasta 2019, debido a que en 2019 se publicaron las nuevas bases curriculares para 2020 y cambiaron las asignaturas para 3° y 4° medio.

El comparar las unidades de genética de 2° medio (programa aún vigente) y de 4° medio (programa vigente hasta 2019), permite identificar que en la asignatura de Biología de 4° medio se trata directamente el contenido de expresión genética, pero este año, 2020, entraron en vigencia las Bases Curriculares de 3° y 4° medio, las cuales fueron publicadas en 2019, e indican las nuevas asignaturas para las diferentes modalidades, ya sea Humanista-Científica (HC) y el Plan de Formación General para HC y las modalidades Técnico Profesional y Artística (MINEDUC, Bases Curriculares de 3° y 4° medio, 2019).

En el caso de la modalidad científico humanista, en el área de Ciencias, se cuentan con cinco asignaturas: Biología de los Ecosistemas, Biología Celular y Molecular, Ciencias de la Salud, Física y Química. En el caso de las asignaturas que se relacionan con el área de biología como: Biología de los Ecosistemas, Biología Celular y Molecular, y Ciencias de la Salud. Al analizar estas tres asignaturas del área de biología (ver tabla 2), se puede identificar que en las asignaturas de Biología Celular y Molecular, y de Ciencias de la Salud, se trata esta temática, pero es necesario señalar que, para el diseño y posterior aplicación en el establecimiento educacional, esta secuencia de enseñanza aprendizaje considerará solamente los contenidos relacionados con la expresión de la información genética de la asignatura de Biología Celular y Molecular.

Tabla 2. Comparación de asignaturas área de Biología de 3° y 4° medio (Fuente: MINEDUC, 2020).

Asignatura	Unidades
Biología de los Ecosistemas	<ul style="list-style-type: none"> • Analizando el estado actual de la biodiversidad. • Analizando la relación entre los servicios ecosistémicos y la sociedad. • Investigando evidencias del cambio climático para generar conciencia ambiental. • Integrando la biología con otras ciencias para dar solución a problemas.
Biología Celular y Molecular	<ul style="list-style-type: none"> • Comprendiendo la estructura y la función de la célula. • Estudiando la versatilidad de las proteínas. • Analizando la relación entre expresión y regulación génica. • Analizando aplicaciones en biología celular y molecular.
Ciencias de la Salud	<ul style="list-style-type: none"> • Salud, sociedad y estilos de vida. • Problemáticas en salud pública. • Genética y salud. • Ciencia y tecnología al servicio de la salud.

Revisión de los textos

Para evidenciar cómo este contenido es enseñado en contexto escolar y universitario, se revisó el contenido de expresión de la información genética en el texto de “Biología Escolar” de 3° y 4° medio de la Editorial Santillana que se utilizaba en la asignatura de biología desde 2012 a 2019, y se comparó con dos textos recomendados en asignaturas de biología de educación superior: “Biología General” de Campbell y Reece (2007) y “Biología, la vida en la Tierra” de Audesirk, Audesirk y Byers (2008). A continuación, en la tabla 3, se presenta información de los textos revisados.

Tabla 3. Información de los textos en los cuales se revisó el contenido de expresión genética (Fuente: Autor).

ID	Título	Autores	Año	Editorial	Unidad o Capítulo	Páginas
L1	Biología 3° y 4° medio	Carolina Abarca B. Andrés Caro C. Diego Fernández V. Sergio Flores C. Cinthia Lepe D. Leonor Pepper B. Estrella Poblete D.	2012	Santillana	Unidad 6: ADN y Biotecnología.	224-233
L2	Biología General	Neil Campbell Jane Reece	2007	Editorial Medica Panamericana	Capítulo 17: Del gen a la proteína	315-326
L3	Biología, la vida en la Tierra	Teresa Audesirk Gerald Audesirk Bruce Byers	2008	Pearson Educación	Capítulo 10: Expresión y regulación de los genes.	168 - 178

El análisis de los textos, se realizó mediante categorías establecidas en la función de la secuencia didáctica en la que aparece la ilustración/contenido, propuestas por Perales y Jiménez (2002). Para realizar esta revisión de los textos, se extrajeron las páginas correspondientes al contenido de expresión de la información genética, y luego se procedió a analizar cada párrafo, a cada párrafo se le denominó unidad de análisis, y cada unidad de análisis fue clasificada de acuerdo a las categorías establecidas por estos autores, y una vez clasificada cada unidad de análisis de los tres textos, en estas categorías, se procedió a calcular su frecuencia total, las cuales se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Frecuencia total de las categorías establecidas por Perales y Jiménez (2002) en los tres textos analizados (Fuente: Autor).

Función	L1	L2	L3
	Biología 3° y 4° medio	Biología General	Biología, la vida en la Tierra
Evocación	0	0	3
Descripción	45	62	47
Definición	4	0	0
Aplicación	3	3	4
Interpretación	0	0	2
Problematización	2	0	0

En el caso del texto de “Biología Escolar”, se evidencia que en las unidades de análisis predomina la descripción, la cual, es seguida por la definición, y por su parte la aplicación está destinada para actividades a realizar al terminar un eje temático. Por otra parte, en el texto de “Biología General”, este sigue una secuencia didáctica en la cual predomina la descripción, y solo en tres unidades de análisis se evidencia la aplicación, pero estas se encuentran luego de muchas unidades de análisis de descripción. En cambio, en el texto de “Biología, la vida en la Tierra”, el texto comienza con la evocación, es decir, relacionando el contenido con una situación cercana para el lector, para luego describir el contenido a tratar, evidenciando en pequeñas unidades de análisis la aplicación e interpretación, dejando ambas, al final de un eje temático, para luego continuar describiendo el contenido extensamente, y aplica e interpreta en pocas ocasiones. En la figura 1, se presenta la comparación de la secuencia didáctica en la que aparecen las ilustraciones/contenidos en los tres textos, y se puede señalar de manera general, que en los tres predomina la descripción.

Comparación de la secuencia didáctica en los tres textos.

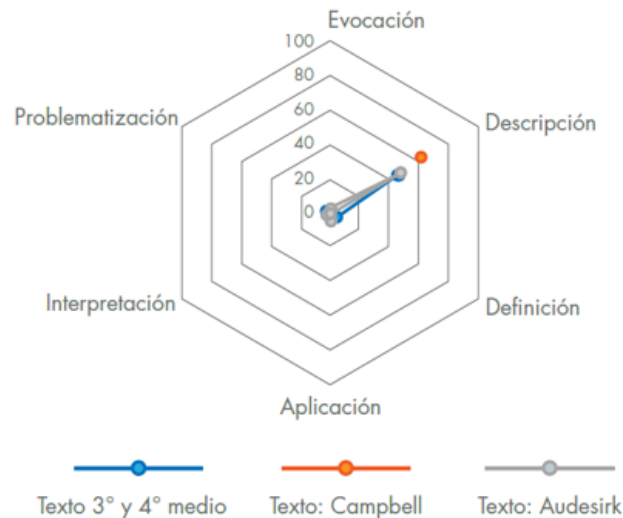


Figura 1: Comparación de la secuencia didáctica en la que aparecen las ilustraciones/contenidos en los tres textos (Fuente: Autor).

La principal diferencia que existe entre estos tres textos es que en el texto de “Biología General” y “Biología la vida en la Tierra”, ambos utilizados en educación superior, abordan en general, los mismos contenidos del texto de “Biología Escolar”, pero la profundidad y el detalle en que estos se tratan es mayor, al igual que las imágenes que se usan, son esquemas más detallados y la explicación de estos viene como una descripción a pie de imagen y además con una explicación complementaria en el texto, ya que se referencia la imagen en los párrafos, lo cual contribuye a su comprensión; caso contrario es lo que ocurre en el texto de “Biología Escolar”, en el cual las imágenes se presentan solamente con el pie de foto sin mayor descripción, y no son referenciadas directamente en el texto.

Al revisar en los textos el contenido de expresión de la información genética, y luego determinar en cada uno de ellos la secuencia didáctica en la que aparecen las ilustraciones/contenidos, permite identificar aquellos aspectos que son necesarios enfatizar en el nuevo diseño didáctico (secuencia de enseñanza aprendizaje), y no quedarse tan solo en actividades o en aspectos que solo sirvan para describir el contenido., sino que a la vez pueda ser tratado desde la indagación científica y a través del ciclo de aprendizaje ECBI, siguiendo una secuencia didáctica en la cual se pueda evocar, problematizar, describir, definir, interpretar y aplicar, junto con ir desarrollando diferentes habilidades y actitudes, provocando que los estudiantes no se queden en la categoría taxonómica de Bloom de recordar y comprender, sino que puedan aplicar, analizar, evaluar y crear.

Revisión de las concepciones alternativas

Etobro y Banjoko (2017), señalan que el término concepciones alternativas, hace referencia a conceptos que se relacionan en como los estudiantes interpretan y el significado que le brindan, de acuerdo a sus percepciones a un fenómeno. Lo que los estudiantes proponen muchas veces no es correcto, debido a que estas creencias se originan en el entorno cercano (antes de la educación formal), y luego son llevadas a la educación formal. Jago (2017),

indica que las preconcepciones o concepciones alternativas que tienen los estudiantes sobre un tema pueden ser una consecuencia de una interpretación incorrecta del fenómeno o debido a eventos de su vida, y si este concepto erróneo no se corrige de inmediato puede conducir a que sea un obstáculo en su proceso de aprendizaje, debido a que les provocará confusión e incoherencia. Para conocer las preconcepciones o concepciones alternativas que poseen los estudiantes sobre el contenido de expresión de la información genética o las ideas que se relacionan con esta temática, se revisaron ocho investigaciones publicadas entre los años 2001 y 2018, las cuales están presentadas en la tabla 5, señalando el nivel educativo o participantes de esta, autores, y las concepciones o ideas identificadas.

Tabla 5. *Concepciones alternativas sobre expresión genética en estudiantes (Fuente: Autor)*

Nivel Educativo/Participantes	Autores	Concepciones alternativas o ideas de los estudiantes
20 estudiantes de 4º de ESO de entre 15 y 16 años, España.	Ageitos, N., y Puig, B. (2016).	Dificultades para ubicar los procesos de transcripción y/o traducción dentro de la célula. No indican la relación específica entre la cadena de aminoácidos y el ARN. Atribuyen al retículo endoplasmático (RE) la capacidad de dirigir el proceso de traducción.
94 estudiantes universitarios (59 obtuvieron el título de licencia y 35 el título de maestría), Marruecos.	Agorram, B., Clement, P., Selmaoui, S., Khzami, S., Chafik, J., y Chiadli, A. (2010).	Los genes son los responsables de la transferencia de información genética. El gen es una secuencia de aminoácidos que tiene la forma de una cadena y se expresa como un fenotipo.
289 estudiantes (158 niños y 131 niñas) de la clase XII (16-18 años) de tres colegios universitarios diferentes en Shillong, Meghalaya, India.	Chattopadhyay, A. (2005).	La información genética está relacionada con el ADN presente en la célula e individuo. La información genética está relacionada con los cromosomas X e Y de los espermatozoides.
39 estudiantes de noveno grado, cuyas edades oscilan entre los 14 y 16 años, Barranquilla, Colombia	Díaz, L., González, A., y Ramos, C. (2018).	Concepto de expresión génica: - Que los genes se expresan en los rasgos físicos heredados de nuestros padres. - Es por donde los genes expresan características similares a nuestros padres o familiares. - Es lo que la genética hace para darle vida a los genes.
35 alumnos de 4º de secundaria, España.	Flores, A. (2018).	El ADN se encuentra en todas las células, no sólo en los gametos. No señalan ninguna diferencia entre el ADN y el ARN.
145 Alumnos de cuarto curso de Educación Secundaria Obligatoria (15-16 años) en Barcelona, España.	Íñiguez, F., y Puigcerver, M. (2013).	Tienen problemas para conocer como es la estructura de los cromosomas, donde se encuentran y su relación con los genes y la molécula de ADN. Desconocen que todas las células poseen información hereditaria.
500 ensayos de estudiantes de grados 9-12, Estados Unidos.	Mills, K., Van Horne, K., Zhang, H., y Boughman, J. (2008).	Un gen es siempre responsable de un rasgo o un gen con una mutación siempre causa una enfermedad. El conocimiento sobre la genética podría ayudar a detener enfermedades y cánceres mortales. La genética ayudará a tratar enfermedades hereditarias.
25 alumnos de Secundaria sexto año del ciclo Superior, La Plata, Argentina.	Rosenberg, C. (2014).	Interpretación errónea del modo de síntesis de cada nueva cadena de ADN.

Al analizar las concepciones alternativas o preconcepciones, que presentan los estudiantes sobre el contenido de expresión de la información genética, se puede señalar que ellos no saben diferenciar entre ADN y ARN, y ni que el ADN está en todas las células del cuerpo y no solo en los gametos. Además, es necesario señalar, que los estudiantes no saben cómo se organiza el material genético, es decir, que el ADN está formado por genes, los cuales son segmentos de este, y que los cromosomas son ADN condensado, señalando solamente que estos se encuentran en las células. En relación a los procesos en cómo se expresa la información genética, ellos presentan dificultades para ubicar de manera adecuada los procesos de transcripción y/o traducción dentro de la célula, y no saben indicar la relación entre la cadena de aminoácidos y el ARN. También, los estudiantes, en relación a la información hereditaria, piensan que esta solamente reside en los gametos, y que no todas las células poseen cromosomas y que no en todas ellas dichos cromosomas tienen una función. Con respecto a la expresión de la información genética, señalan que es la forma en que los genes expresan características similares a nuestros padres o familiares, y que estos expresan los rasgos heredados de los progenitores.

Conocer las concepciones alternativas sobre la expresión de la información genética, permite la construcción de un mapa de progreso, el cual se define como: “la descripción general de la secuencia de conocimientos que un niño debiera alcanzar en un determinado ciclo del nivel de aprendizaje en que se encuentre” (LaTorre, 2014, p. 212). Un mapa de progreso permite establecer y jerarquizar los conocimientos que poseen los estudiantes, para así entender los conocimientos de que disponen, es decir, la base conceptual desde donde se deberían abordar estos contenidos en el aula, y a la vez diseñar actividades adecuadas para cada nivel y que además permitan cambiar esas preconcepciones, junto con desarrollar habilidades y actitudes. Un mapa de progreso, no solo representa el nivel de progreso que deben alcanzar los estudiantes sobre una temática específica, sino que también, permite ordenar los contenidos que deben ser tratados, y establecer relaciones entre ellos, y a la vez que estos niveles contribuyan al diseño de actividades de clases, las cuales deben estar orientadas a que los estudiantes puedan progresar de un nivel a otro.

Clasificación de las concepciones alternativas: Mapa de progreso.

Se revisó en la literatura las clasificaciones sobre el contenido de expresión de la información genética, pero la mayoría de los criterios utilizados en estas hacían referencia a mitosis, meiosis, deriva génica o leyes de Mendel, y se alejaban de la temática de expresión de la información genética, pero en el artículo “Beyond the Cell: Using Multiscalar Topics to Bring Interdisciplinarity into Undergraduate Cellular Biology Courses” (traducción: Más allá de la célula: uso de temas multiescalares para llevar la interdisciplinariedad a los cursos universitarios de biología celular) de la autora Carolyn F. Weber, publicado en la revista CBE—Life Sciences Education el año 2016, esta autora propone ejemplos de temas que podrían vincular a la biología celular con los cinco conceptos centrales para la alfabetización biológica, la vida cotidiana y otras disciplinas, los cuales son: necesidades elementales de las células (1); estructura y función de la proteína (2); crecimiento y división celular (3); estructura y función del ADN (4); comunicación célula-célula (5) y herencia genética (6). (Weber, 2016).

Algunos de estos criterios (o mejor dicho, ejemplos de temas) se relacionan directamente con la expresión de la información genética (2), otros quedarían incompletos (3, 4 y 5) y otros se alejan de esta temática (1 y 6), estos temas se tomaron como punto de partida para proponer un sistema de clasificación de las interpretaciones o concepciones alternativas que tienen los estudiantes sobre expresión de la información genética, la cual se determinó al revisar y analizar las concepciones alternativas presentadas en la literatura y establecer criterios comunes entre ellas.

Dado todo lo señalado anteriormente, el sistema de clasificación propuesto consta de cuatro niveles relacionados con los contenidos disciplinares necesarios para lograr la comprensión de la expresión de la información genética; en la tabla 6, se presentan los niveles de progresión de aprendizajes sugeridos para el contenido de expresión genética con su respectiva descripción. Para cada nivel propuesto se indica entre paréntesis la relación con los criterios (o, mejor dicho, ejemplos de temas) propuestos por Weber (2016): expresión fenotípica (relacionado con criterio 2); célula (relacionado con criterio 3 y 5), procesos moleculares (relacionado con criterio 2 y 4) y estructuras moleculares (relacionado con criterio 2 y 4).

Tabla 6. Descripción de los niveles de Progresión de Aprendizaje sugeridos para el contenido de Expresión Genética (Fuente: Autor).

Nivel	Descripción
Expresión fenotípica	Se espera que los estudiantes identifiquen que la finalidad de la expresión genética es determinar una característica, la cual es producida por las proteínas, las cuales tienen funciones fisiológicas y estructurales. Además, deben reconocer que la expresión genética determina el fenotípico, es decir, las características observables.
Célula	Los estudiantes deben identificar la estructura de la célula, e identificar que en el ADN se encuentra la información genética, y este sintetiza al ARN, el cual es traducido por el ribosoma para formar proteínas, las cuales muchas veces son determinantes en el proceso de diferenciación celular, debido a que tienen funciones estructurales, enzimáticas, hormonales, defensiva, transporte, contráctil y energética.
Procesos moleculares	Los estudiantes deben identificar que mediante el proceso de transcripción se sintetizan moléculas de ARN, y que luego en el proceso de traducción se sintetizan proteínas. Además, deben señalar la importancia del código genético para la síntesis de proteínas y su participación en la traducción de estas, junto con reconocer a través de él, cómo se sintetizan proteínas a partir de los aminoácidos.
Estructuras moleculares	Se espera que los estudiantes identifiquen que la información genética se encuentra contenida en el ADN, el cual está formado por diferentes genes, y que reconozcan que, a partir del ADN, se forma un ARN que contiene la información necesaria para codificar proteínas. Además, los estudiantes deben identificar que las mutaciones se producen a nivel del ADN, y que estas tienen una consecuencia en la expresión de la información genética.

A continuación, en la figura 2 se presenta el mapa de Progresión de Aprendizaje sugerido para el contenido de Expresión Genética con los respectivos contenidos a tratar en cada uno de los niveles, ya que, la descripción de cada nivel se presentó en la tabla 6.

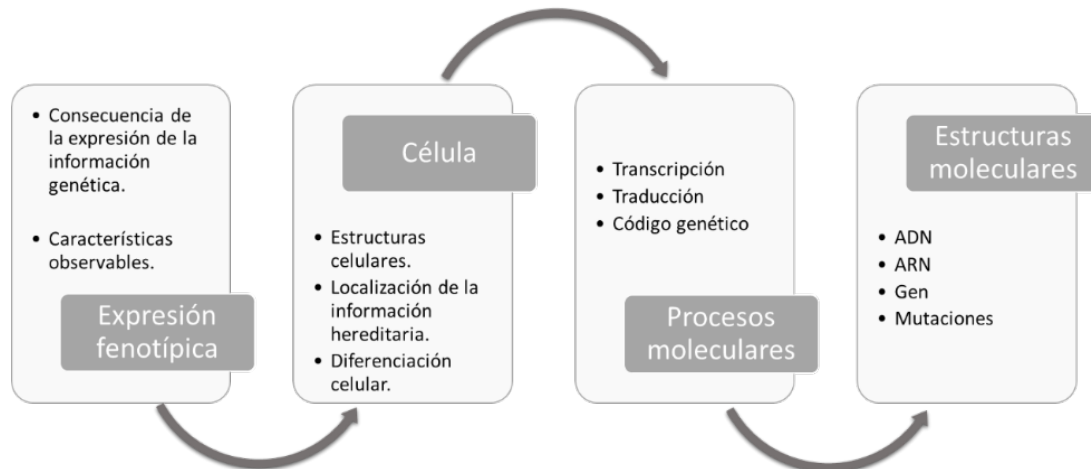


Figura 2: Mapa de Progresión de Aprendizaje sugerido para el contenido de Expresión Genética (Fuente: Autor).

Justificación del diseño de la secuencia

Para el diseño de esta Secuencia de Enseñanza Aprendizaje (SEA), se ha seleccionado el modelo de reconstrucción educativa, el cual, de acuerdo a Couso (2012), es un modelo utilizado para diseñar SEA basadas en investigaciones, donde un problema es quien guía los contenidos a enseñar y a aprender, además, es necesario considerar el contenido disciplinar y las necesidades (o intereses) de los estudiantes; junto con que el conocimiento científico a enseñar se integre en algún contexto que permita que ellos aprendan (Duit, 2007, citado en Couso, 2012). En este modelo, se le brinda importancia a reconstruir el contenido a enseñar, para que conecte los contenidos científicos con las interpretaciones que poseen los estudiantes y, además, se basa en ideas constructivistas para el logro de los aprendizajes, en las cuales se destaca la construcción personal del conocimiento durante las actividades propuestas, en las cuales se abordan conceptos/temáticas, de manera secuencial, es decir, que unos conceptos se construyen a partir de otros (Couso, 2012).

En este caso, la secuencia didáctica propuesta, inició su diseño “reconstruyendo” el contenido de expresión de la información genética, esto quiere decir, buscando la manera de hacerlo enseñable; que fuera atractivo para los estudiantes y que les sirviera para la vida y la sociedad, pero que a la vez estuviera enmarcado dentro del marco curricular vigente para tercero y cuarto año medio del programa nuevo de la asignatura de Biología Celular y Molecular. La forma en que se va a enseñar el contenido de expresión de la información genética será mediante el uso de una enfermedad de origen genético como es la anemia falciforme, y “luego, para diseñar la secuencia de actividades, (...) [utilizamos] un ciclo de aprendizaje, en el que cada actividad tiene un objetivo de enseñanza específico, de acuerdo con la demanda de aprendizaje de la SEA, siguiendo una progresión” (Couso 2012, p. 73).

Foco a utilizar: Indagación científica.

La enseñanza de la ciencia basada en la indagación, es una estrategia que permite poner en práctica la metodología indagatoria utilizada por la ciencia cuando esta es utilizada en el aula, en ella los estudiantes deben: desarrollar ideas y conceptos científicos, utilizar procedimientos científicos para estudiar el mundo y construir su conocimiento, realizar un aprendizaje activo e ir desarrollando a lo largo del proceso la comprensión, además, de desarrollar habilidades sociales, lingüísticas y de comunicación, ya que los integrantes del equipo aprenden a escucharse y a considerar las opiniones, ideas y aportes de cada uno, además de desarrollar habilidades para seleccionar información, evidencias y experiencias, para dar a conocer sus ideas, pensamientos y conclusiones (Dyasi, 2014).

Por su parte, Vergara y Cofré (2012), señalan que la indagación en la educación científica conduce a los estudiantes a comprender contenidos e ideas científicas, además de comprender que la indagación científica es aquello que realizan los científicos, junto con que esta es guiada por una pregunta de investigación, la cual se toma como punto de partida para los procedimientos o pasos a seguir, y que las explicaciones o conclusiones propuestas tienen que ser acordes con los datos o información obtenida. Devés y Reyes (2007), señalan que la metodología indagatoria para el aprendizaje (educación) en ciencias se basa en el proceso de aprendizaje que surge de una investigación, además, de que los estudiantes utilizan procesos para la búsqueda de conocimiento, los cuales son muy similares a los usados por los científicos, dado esto, el Programa ECBI•Chile (sf), estructura las clases en las cuales se utiliza la metodología indagatoria en torno a un ciclo de aprendizaje el cual consta de cuatro fases: focalización, exploración, reflexión y aplicación, las cuales Brown (2008) describe de la siguiente manera:

- **Focalización:** Se crean situaciones o actividades que permitan a los estudiantes indagar y clarificar conceptos previos, representaciones y preconcepciones sobre algún contenido o problema a investigar; hacerse preguntas y predicciones, junto con diseñar estrategias para obtener información sobre la problemática planteada.
- **Exploración:** Se realizan actividades en las cuales los estudiantes exploran, investigan, identifican o proponen nuevos problemas, y buscan respuesta a la pregunta inicial estableciendo en qué medida sus ideas previas se contrastan con la realidad, la tarea del docente es hacer que los estudiantes se comprometan en qué, para qué y cómo realizar sus investigaciones y que puedan consensuar sus ideas.
- **Reflexión:** Los estudiantes analizan las observaciones y los datos recolectados, y los contrastan con sus predicciones o hipótesis iniciales, además, de relacionarlas con lo investigado, y así pueden desarrollar nuevas explicaciones para lo que han observado e investigado. El profesor en esta etapa ayuda a que los estudiantes conceptualicen lo aprendido y propicia la discusión de los resultados, para organizarlos y comunicarlos.
- **Aplicación:** Las actividades se orientan para que los estudiantes apliquen los aprendizajes adquiridos a nuevas situaciones o problemas, por lo que el docente debe guiar a los estudiantes a que discutan y apliquen los conceptos, definiciones, explicaciones, nomenclatura y habilidades a situaciones experimentales o cotidianas.

Las actividades de esta Secuencia de Enseñanza Aprendizaje (SEA), se basaron en la metodología indagatoria, utilizando el ciclo de aprendizaje ECBI (focalización, exploración,

reflexión y aplicación), y el tipo de indagación utilizada, es la indagación estructurada, debido a que en las diferentes guías de trabajo se entrega la pregunta de investigación o situación problema, junto con los procedimientos a seguir.

Organización curricular

En la tabla 7, se presenta la organización curricular de la SEA propuesta, considerando el curso, asignatura, contenidos y objetivos de aprendizaje, entre otros aspectos curriculares. Además, es necesario recalcar que esta SEA, considerará indicadores de evaluación relacionados con el OA elegido, los cuales se dividen en tres: indicadores de contenidos, indicadores de habilidades e indicadores de actitudes.

Tabla 7. Organización curricular de la SEA (Fuente: Autor).

Aspecto	Descripción
Curso.	3° y 4° medio (fue aplicada en 3° medio)
Asignatura.	Biología Celular y Molecular (formación diferenciada).
Unidad.	“Analizando la relación entre expresión y regulación génica”.
Objetivo de aprendizaje a abordar en la SEA.	OA 3. Analizar críticamente el significado biológico del dogma central de la biología molecular en relación al flujo de la información genética en células desde el ADN al ARN y a las proteínas.
Contenidos a abordar en la SEA.	Dogma central de la biología molecular: expresión de la información genética, flujo de la información genética, ADN, ARN y proteínas.
Gran idea de la ciencia.	GI 9: La información genética es transmitida de una generación de organismos a la siguiente generación.
Destinatarios.	Estudiantes de tercero medio del electivo de Biología Celular y Molecular de un colegio particular subvencionado de la ciudad de La Serena, Región de Coquimbo, Chile.
Temporalidad.	8 Sesiones (de 90 minutos cada una)
Indicadores de contenidos	<ul style="list-style-type: none"> - Identifican diferentes tipos de enfermedades de origen genético. - Interpretan información escrita para caracterizar los signos o síntomas de una enfermedad genética. - Explican el proceso de formación de los glóbulos rojos. - Diferencian la morfología de los glóbulos rojos normales y mediante una simulación la forma de este en la anemia falciforme.

	<ul style="list-style-type: none"> - Deducen la relación entre los procesos de transcripción y de traducción, en el contexto de la expresión genética. - Elaboran un modelo considerando el flujo de la información genética (ADN, ARN y proteínas). - Explican la consecuencia de las mutaciones genéticas en el origen de algunas enfermedades. - Atribuyen que los efectos de factores ambientales, como por ejemplo el sol, provocan mutación del material genético.
Indicadores de habilidades	<ul style="list-style-type: none"> - Formulan una hipótesis para dar una explicación tentativa a un problema científico que debe validarse con evidencias. - Desarrollan y usan modelos basados en evidencia, para explicar un fenómeno. - Diseñan un procedimiento para poder observar glóbulos rojos. - Identifican conocimientos científicos involucrados en un problema.
Indicadores de actitudes	<ul style="list-style-type: none"> - Expresan ideas basadas en evidencia que permiten explicar una situación problema. - Realizan acciones y practican hábitos que demuestren persistencia en las diversas actividades que desarrollan. - Expresan en forma escrita sus emociones y sensaciones frente a la satisfacción por los logros alcanzados en sus aprendizajes.

Esta secuencia de enseñanza aprendizaje está formada por ocho actividades, las cuales se resumen en la tabla 8.

Tabla 8. Resumen de las actividades de la secuencia de enseñanza aprendizaje. (Fuente: Autor)

Título de la actividad	Objetivo	Contenido	Descripción	Fase ciclo ECBI
Actividad 1: Identificando enfermedades genéticas.	Describir enfermedades hereditarias a partir de preconceptos y plantear posibles hipótesis de sus orígenes.	Enfermedades de origen genético.	Los estudiantes deben recordar y dar características de enfermedades de origen genético, además, de realizar una síntesis mediante un organizador gráfico.	Focalización.
Actividad 2: ¿Es la anemia falciforme una enfermedad hereditaria?	Definir conceptos claves que nos permitan entender la anemia falciforme.	Enfermedades de origen genético.	Se propone que los estudiantes describan la morfología de un glóbulo rojo normal y un glóbulo rojo en la anemia falciforme, y las causas y consecuencias de esta enfermedad mediante la historia de Geno Atkins.	Focalización.
Actividad 3: ¿Cómo se	Reconocer las estructuras celulares que participan en la	Importancia de las	Los estudiantes deben analizar un video sobre la formación de los eritrocitos o glóbulos rojos, y luego confeccionar un organizador	Exploración.

forman los eritrocitos o los glóbulos rojos?	formación de los glóbulos rojos.	proteínas en la expresión genética.	gráfico de este proceso, para posteriormente relacionarlo con la enfermedad de anemia falciforme.	
Actividad 4: ¿Podrá la forma del glóbulo rojo ser importante para llevar a cabo su función?	Identificar la forma que poseen los glóbulos rojos.	Morfología celular.	Se realiza una actividad de laboratorio de manera virtual mediante el uso de videos para observar la morfología de un glóbulo rojo al microscopio óptico.	Exploración.
Actividad 5: ¿De qué manera la estructura primaria de la hemoglobina puede relacionarse con una enfermedad?	Describir las características y funciones de la hemoglobina.	Expresión de la información genética.	Los estudiantes deben analizar la función y estructura de la hemoglobina mediante una lectura, para luego simular el proceso de síntesis de un segmento de esta, para diferenciar la estructura de la proteína en un individuo sano y en otro con una mutación para anemia falciforme.	Exploración.
Actividad 6: ¿Cómo puede explicar que la estructura de la hemoglobina depende de la información genética?	Relacionar la información genética con las proteínas, mediante la elaboración de modelos que expliciten la expresión de la información hereditaria.	Flujo de la información genética.	Los estudiantes, deben confeccionar un modelo de manera digital de la expresión genética del gen de la proteína hemoglobina, para ello deben tomar como referencia la cadena de ADN, ARNm y secuencia de aminoácidos que confeccionaron/trabajaron en la clase anterior.	Exploración.
Actividad 7: Reflexionando sobre la expresión genética.	Analizar la importancia del ADN, ARN y proteínas en la expresión de la información genética.	Mutaciones genéticas.	Los estudiantes, deben reflexionar en torno a un video de la anemia falciforme y contrastar lo señalado en el video con todos sus resultados obtenidos en las sesiones anteriores, y finalmente responder preguntas sobre la expresión de genes, mutaciones y código genético.	Reflexión.
Actividad 8: ¿Cómo algunos factores externos (biológicos, químicos o físicos) pueden ser responsables de mutaciones genéticas?	Evaluar los efectos de los rayos UV en la expresión de la información genética.	Mutaciones genéticas.	Los estudiantes deben poder aplicar la expresión genética a las consecuencias que tiene la exposición a los rayos UV para los seres humanos y su posterior desarrollo de cáncer de piel, deben representar lo ocurrido a nivel celular mediante un modelo.	Aplicación.

Proceso de aplicación

Debido a las circunstancias actuales, pandemia de COVID 19 y clases a distancia (online) durante el año escolar 2020, es que solamente se pudieron aplicar tres de las ocho actividades

que forman parte de esta secuencia de enseñanza aprendizaje (SEA), es decir, las actividades 2, 3 y 4 (denominadas de ahora en adelante actividades 1, 2 y 3 respectivamente). La modalidad de trabajo online, ocasionó que las actividades que estaban diseñadas inicialmente para ser aplicadas de manera presencial, se tuvieron que adaptar y/o modificar para ser desarrolladas de forma online.

Validación de la secuencia

Esta secuencia didáctica fue sometida a tres validaciones:

- 1) Validación interna, denominado modelo de Elliot para el ajuste de actividades: El cual permite realizar ajustes al diseño propuesto para que sea aplicado de la mejor manera, ya sea modificando la redacción de las preguntas o adecuando las actividades.
- 2) Validación externa, denominada, modelo de evaluación respondiente de Robert Stake: El modelo propuesto por Robert Stake, considera dos matrices, las cuales proporcionan información en relación a los procesos y resultados, una en la cual se describen las tareas, considerando las intenciones y las observaciones, y la otra permite emitir juicios, y el análisis de ambas, aportan datos relacionados con los antecedentes, procesos y resultados (Fonseca, 2007).
- 3) Validación por pares y expertos: Esta validación fue realizada por una especialista en didáctica y educación en ciencias, con experiencia en educación superior y educación escolar, además de una profesora de aula de biología y ciencias naturales. Las actividades fueron evaluadas según criterios de suficiencia, claridad, coherencia y relevancia.

Metodología

La Investigación Basada en el Diseño (IBD) o Design-Based Research (DBR), busca diseñar, desarrollar y evaluar las intervenciones educativas para poder encontrar diferentes soluciones a problemas complejos del contexto escolar (Plomp, 2010, en de Benito e Ibáñez, 2016). Este tipo de investigación, permite estudiar la actividad educativa para poder mejorarla mediante la resolución de problemas que sean identificados en el mismo contexto, usando teorías científica o modelos, por lo que es necesario que se diseñen diferentes recursos educativos (de Benito e Ibáñez, 2016). Dado esto, se logran ofrecer soluciones a los diferentes problemas educativos a partir de los resultados obtenidos de una investigación, para poder aportar diferentes innovaciones para poder mejorar el proceso de enseñanza y aprendizaje (Valverde-Berrocoso, 2016).

La IBD, se puede definir como un modelo metodológico, el cual busca aportar soluciones para los problemas que surgen en el contexto educativo, permitiendo generar diferentes productos que aborden estos problemas, pero que a la vez generen un impacto en el proceso de enseñanza y aprendizaje de los estudiantes. Dado lo anterior, la IBD parte de un problema el cual puede tener un significado científico y/o práctico, y en este proceso, lo que se busca es identificar el problema, cómo se puede abordar y las soluciones desarrolladas o las teorías utilizadas (Valverde-Berrocoso, 2016). La IBD, buscar aumentar el impacto, de lo

investigado para poder mejorar la práctica educativa, debido a que se comienza evaluando el contexto, realizando revisiones bibliográficas, para posteriormente levantar un diseño para poder superar algún tipo de problema o poder mejorar alguna práctica educativa (Anderson y Shattuck, 2012).

El problema de la enseñanza de la expresión de la información genética, radica en que se enseña mediante el uso de imágenes, dibujos, esquemas, fotos y gráficos, dado que estos permiten mostrar estructuras y/o procesos que no se pueden observar a simple vista, ya que, son procesos que ocurren en el interior de las células (Rosenberg, 2014); a esto se suma, que los docentes, generalmente, enseñan estos contenidos mediante clases expositivas y utilizando esquemas con lenguaje simbólico, en los cuales hay siglas y flechas para guiar y ejemplificar los procesos celulares; muchas veces los estudiantes memorizan lo que el docente les explica o enseña, pero no lo logran comprender o aplicar en algún contexto de su vida o en la sociedad.

Objetivo general:

- Explorar los aprendizajes sobre la noción científica de expresión de la información genética alcanzados por estudiantes de 3° medio del electivo de biología celular y molecular, mediante el diseño y aplicación de una secuencia de enseñanza aprendizaje (SEA) con foco en la indagación científica.

Objetivos específicos:

- Diseñar una secuencia de enseñanza y aprendizaje sobre el contenido de expresión de la información genética, que promueva la indagación científica.
- Explorar las ideas sobre enfermedades genéticas que surgen en los estudiantes a partir del desarrollo de una actividad de la fase de focalización de la metodología indagatoria.
- Analizar los criterios utilizados por los estudiantes para considerar que una enfermedad es de origen genético, a partir del desarrollo de actividades de la fase de exploración de la metodología indagatoria.
- Identificar las relaciones entre los conceptos utilizados por los estudiantes en sus respuestas sobre la temática de expresión de la información genética.

Pregunta de investigación

- ¿Cuáles son los aprendizajes sobre la noción científica de expresión de la información genética alcanzados por estudiantes de 3° medio del electivo de biología celular y molecular, mediante el diseño y aplicación de una secuencia de enseñanza aprendizaje con foco en la indagación científica?

Supuesto:

- La indagación científica mejora los aprendizajes relacionados con la noción científica de expresión de la información genética, específicamente en los niveles de progresión de expresión fenotípica y célula.

Enfoque, tipo de estudio, método y participantes:

Esta investigación corresponde a un diseño metodológico cualitativo de tipo descriptivo no experimental, y el método es un estudio de caso. En esta investigación, se analizaron las respuestas textuales de guías de trabajo desarrolladas por cuatro estudiantes de 3° medio, de un Colegio Particular Subvencionado (Corporación Educacional), de la ciudad de La Serena, Región de Coquimbo, que cursaban el electivo de Biología Celular y Molecular, cuya edad fluctuaba entre los 16 y 17 años. A partir de sus respuestas, se realizó una descripción sobre las ideas relacionadas con enfermedades de origen genético que poseen estos estudiantes, determinadas mediante la aplicación de una secuencia de enseñanza aprendizaje sobre el contenido de expresión de la información genética que utiliza como foco la indagación científica.

Instrumento de recolección de datos y tipo de análisis:

Los datos fueron recogidos mediante el análisis textual de las respuestas de las guías de actividades 2, 3 y 4 (denominadas de ahora en adelante actividades 1, 2 y 3) desarrolladas en el contexto de las clases del electivo de biología celular y molecular, es decir, se realizó un análisis de contenido, el cual Flick (2012) describe como un procedimiento utilizado para analizar el material textual. El análisis de los datos de las respuestas textuales de las guías, se realizó mediante codificación y categorización. El tipo de codificación utilizada, es la codificación abierta, la cual según Flick (2012), trata de expresar los datos obtenidos en forma de conceptos, y luego las expresiones se clasifican de acuerdo a unidades de significado (palabras o frases), para luego ser asignadas en categorías.

Matriz de análisis:

Guía para la elaboración de las actividades con metodología indagatoria.

El diseño didáctico de esta Secuencia de Enseñanza Aprendizaje, se fundamenta desde el Ciclo de Aprendizaje de la Metodología Indagatoria propuesto por el Programa ECBI•Chile (Educación en Ciencias Basadas en la Indagación de la Universidad de Chile), el cual considera las siguientes fases: focalización, exploración, reflexión y aplicación. A continuación, en la tabla 9, se presenta una matriz sobre las características que deben tener las actividades en las fases de focalización, exploración, reflexión y aplicación, adaptada de Escobar (2016). Esta matriz, permitió analizar los datos de las guías de trabajo para poder evidenciar si estas contribuían al desarrollo de indagación científica en estudiantes de 3° medio del electivo de biología celular y molecular; esto se evidenciará si las acciones realizadas por los estudiantes en el desarrollo de las guías corresponde a lo que deberían realizar en cada una de las fases del ciclo indagatorio (columna descripción de la actividad y observaciones), lo cual se determinará analizando cada una de las actividades e interpretándolas.

Tabla 9. Características de las fases del ciclo de aprendizaje ECBI (adaptado de Escobar, 2016:52).

Categorías	Descripción de la actividad	Ejemplos extraídos de esta SEA
Focalizar	Diseño de actividades encaminadas a retomar preconceptos, observar fenómenos, seleccionar información, ejercicios de lectoescritura, describir, clarificar, discutir, formular y responderse preguntas.	Los estudiantes tienen que identificar sus ideas previas, dando respuesta, por ejemplo, a las siguientes preguntas: ¿Cuál podría ser la consecuencia, signo o síntoma que podrían tener las personas que padezcan la enfermedad de anemia falciforme?, y ¿cómo se relacionarían esos signos y síntomas con la morfología del eritrocito? o ¿Cuál cree que sería la mejor forma para diagnosticar esta enfermedad?, ¿Qué estructura celular habría que observar? Fundamente.
Explorar	Las actividades propuestas permiten que se dé por diferentes rutas respuesta a las preguntas formuladas. Los estudiantes buscan relaciones causa – efecto, realizan mediciones e identifican variables. La categoría está orientada a la construcción y sistematización de datos e información.	Los estudiantes para poder identificar la morfología de los glóbulos rojos, deben diseñar un procedimiento experimental, para posteriormente contrastarlo con el entregado por el docente, y luego ejecutarlo, y registrar sus observaciones.
Reflexionar	Actividades orientadas a organizar resultados, analizar ideas, plantear preguntas, exponer sus ideas. Corresponde al análisis de la información desde la perspectiva del estudiante apoyado en sus preconceptos y nuevos aprendizajes.	Los estudiantes, deben reflexionar en torno a un video de la anemia falciforme y contrastar lo señalado en el video con todos sus resultados obtenidos en las sesiones anteriores, y finalmente responder preguntas sobre la expresión de genes, mutaciones y código genético.
Aplicar	Categoría orientada (...) con fines de interpretar y otras actividades enfocadas al uso de información en diferentes contextos o situaciones de la vida real. También se da respuesta a preguntas propuestas en el desarrollo de la unidad.	Los estudiantes deben poder aplicar la expresión genética a las consecuencias que tiene la exposición a los rayos UV para los seres humanos y su posterior desarrollo de cáncer de piel.

Avance en los niveles de Progresión de Aprendizaje.

El mapa de progreso propuesto para el contenido de expresión de la información genética, consta de cuatro niveles relacionados con los contenidos disciplinares necesarios para lograr la comprensión de la expresión de la información genética: expresión fenotípica, célula, procesos moleculares y estructuras moleculares. Dado que se pudieron aplicar tres actividades; una correspondiente al nivel expresión fenotípica y dos de nivel célula, solo se pudieron identificar la progresión de los estudiantes desde el nivel expresión fenotípica, pasando por o superando el nivel célula, ver tabla 10. Para identificar si los estudiantes lograron alcanzar esa progresión, se utilizaron los criterios propuestos en la definición de cada uno de los niveles, los cuales se dividieron en enunciados (objetivos) que debieron ser cumplidos, para lo cual, se realizó un análisis de las respuestas textuales de los estudiantes.

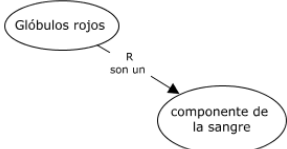
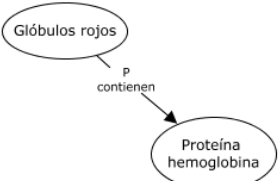
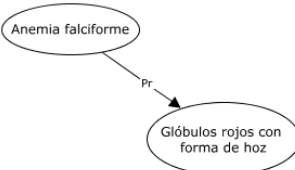
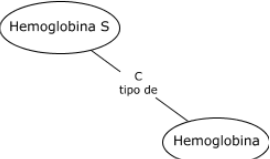
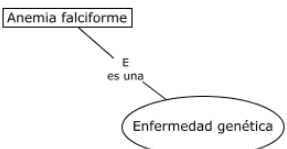
Tabla 10. Descripción de los niveles de Progresión de Aprendizaje sugeridos para el contenido de Expresión Genética (Fuente: Autor).

Nivel/Activ	Contenido	Descripción	Objetivos
Expresión fenotípica Actividad 2 (guía 1)	Consecuencia de la expresión de la información genética Características observables	Se espera que los estudiantes identifiquen que la finalidad de la expresión genética es determinar una característica, la cual es producida por las proteínas, las cuales tienen funciones fisiológicas y estructurales. Además, deben reconocer que la expresión genética determina el fenotípico, es decir, las características observables.	Identificar que la finalidad de la expresión genética es determinar una característica. Describir que las características son producidas por las proteínas, las cuales tienen funciones fisiológicas y estructurales. Reconocer que la expresión genética determina el fenotípico, es decir, las características observables.
Célula Actividad 3 (guía 2) Actividad 4 (guía 3)	Estructuras celulares. Localización de la información hereditaria. Diferenciación celular.	Los estudiantes deben identificar la estructura de la célula, e identificar que en el ADN se encuentra la información genética, y este sintetiza al ARN, el cual es traducido por el ribosoma para formar proteínas, las cuales muchas veces son determinantes en el proceso de diferenciación celular, debido a que tienen funciones estructurales, enzimáticas, hormonales, defensiva, transporte, contráctil y energética.	Identificar las estructuras de la célula. Identificar que en el ADN se encuentra la información genética, y este sintetiza al ARN, el cual es traducido por el ribosoma para formar proteínas. Describir que muchas veces las proteínas son determinantes en el proceso de diferenciación celular, debido a que tienen funciones estructurales, enzimáticas, hormonales, defensiva, transporte, contráctil y energética.

Relaciones de Thagard

Dado que el análisis de los datos será mediante un análisis de contenido de las respuestas textuales de los estudiantes, es necesario visualizar cómo su contenido es representado. Para ello, se utilizaron los mapas conceptuales de Thagard (1992). De acuerdo a Marzábal e Izquierdo (2017), estos mapas, proponen una representación de los sistemas conceptuales (conceptos) y sus relaciones, las cuales se dividen en cinco: relaciones de regla, parte, propiedad, ejemplo y clase. En la tabla 11, se presentan las cinco relaciones, con su descripción y un ejemplo con su respectiva representación, relacionados con el contenido de expresión de la información genética y su relación con los glóbulos rojos.

Tabla 11. Ejemplos y representación de las relaciones en los mapas de Thagard (Fuente: Marzábal e Izquierdo (2017:116) y Sepúlveda (2017:12))

Relación	Descripción	Ejemplo	Representación
Regla	Expresan relaciones generales entre conceptos. Se designan con la letra R y se identifican con líneas terminadas en punta de flecha. Concepto en una elipse.	El glóbulo rojo es un componente de la sangre.	
Parte	Indican que alguna cosa está formada por partes, permiten jerarquías. Se designan con la letra P y se identifican con líneas rectas en punta de flecha. Concepto en una elipse.	Los glóbulos rojos contienen la proteína hemoglobina.	
Propiedad	Indican que un objeto tiene una determinada propiedad. Se designan con la letra Pr y se identifican con líneas terminadas en punta de flecha. Concepto en una elipse.	Los glóbulos rojos en la anemia falciforme tienen forma de hoz.	
Clase	Permiten jerarquías, indican que un concepto es un «tipo de...». Un concepto es una especie de otro. Se designan con la letra C y se identifican con una línea recta. Concepto en elipse.	La hemoglobina S es un tipo de hemoglobina pero mutada.	
Ejemplo	Indican que un objeto particular es un ejemplo de un concepto. Se designan con la letra E y se identifican con una línea recta. Concepto en un rectángulo.	La anemia falciforme es un ejemplo de enfermedad genética.	

Resultados y discusión

Se diseñó una secuencia de enseñanza aprendizaje sobre el contenido de expresión de la información genética, la cual está compuesta por ocho actividades, dos por cada una de las fases del ciclo indagatorio (focalización, exploración, reflexión y aplicación). Es necesario señalar que estas actividades fueron diseñadas para tratar este contenido, y para desarrollar habilidades y actitudes científicas. De las ocho actividades iniciales de esta secuencia didáctica, solo se pudieron aplicar tres, es decir, las actividades 2, 3 y 4 (denominadas de ahora en adelante actividades 1, 2 y 3 respectivamente), siendo la actividad 2 de la fase de focalización y las actividades 3 y 4 de exploración.

Una vez analizada la matriz completada para cada actividad, se pudo determinar que mediante el diseño de estas actividades, los estudiantes pudieron desarrollar principalmente habilidades indagatorias de las fases de focalización (actividad 1), como por ejemplo, identificar estructuras de acuerdo a sus conocimientos previos, conocer sus ideas previas sobre la temática, proponer ideas de cómo se podría diagnosticar una enfermedad, extraer información de un texto para contrastar sus ideas iniciales y plantear hipótesis, por su parte, las habilidades desarrolladas en las actividades exploración (actividad 2 y 3) se relacionan

con: diseñar procedimiento experimental, comprobar procedimiento experimental, sintetizar información, relacionar la información presentada con la evidencia obtenida (en este caso, vista en el video), etc. Se puede señalar que, mediante el análisis de las respuestas textuales entregadas en las guías de trabajo por las cuatro estudiantes, se evidencia que todas desarrollan habilidades indagatorias.

Ideas sobre enfermedades genéticas.

Las ideas sobre las enfermedades genéticas que poseen estas estudiantes del Electivo de Biología Celular y Molecular, están relacionados principalmente con la forma en que se diagnostica este tipo de enfermedades, la forma en cómo se heredan y el origen a nivel genético de estas. Para dar inicio a la unidad, a los estudiantes se les presentó como ejemplo de enfermedad relacionada con la expresión de la información genética, el caso de la anemia falciforme, la cual tiene que como principal característica que los glóbulos rojos adquieran forma de hoz o media luna, debido a una alteración en la proteína hemoglobina. Los estudiantes señalan, que para el diagnóstico de esta enfermedad es necesario consultar antecedentes familiares, ya que, para que esta enfermedad sea hereditaria, uno de los progenitores (padre o madre) debe padecerla y el otro portar el rasgo de la enfermedad o ambos portarlo, para que se logre expresar. Además, señalan que esta consecuencia en la expresión genética de la proteína hemoglobina (o si se generaliza en cualquier enfermedad de tipo genética), son producidas por una mutación a nivel del ADN, la cual provocaría en su expresión que se produzca un cambio en algún aminoácido de la proteína a sintetizar, lo cual vería afectado el fenotipo que estaba determinado inicialmente.

Criterios utilizados para definir que una enfermedad es de origen genético:

Los criterios utilizados por los estudiantes del Electivo de Biología Celular y Molecular para considerar que una enfermedad es de origen genético, están relacionados principalmente con su origen (mutación genética heredada de los progenitores), estructura molecular en la cual ocurre la mutación que se expresará en el fenotipo. Además, los estudiantes señalan que las mutaciones genéticas que provocan enfermedades hereditarias no son reversibles, dado que son heredadas desde los progenitores, pero con tratamientos médicos se puede afrontar. La actividad final consistió en un laboratorio virtual, en el cual, usando videos de muestras de sangre, los estudiantes debieron identificar las diferencias en la morfología que presentan los glóbulos rojos en una persona sana y en otra persona que padece de anemia falciforme. En este caso, pudieron comprobar con un ejemplo claro, que el fenotipo se ve afectado por mutaciones genéticas, comparando estas dos muestras de células sanguíneas. Por ende, otro criterio que se podría utilizar para considerar que una enfermedad es de origen genético, podría ser comparando, como es en este caso, células que tienen igual origen y destinadas para la misma función, pero que tienen una mutación, y ahí deducir el origen de esa diferencia y la consecuencia que podría provocar a nivel fisiológico.

Análisis de respuestas textuales de los estudiantes.

Las respuestas textuales de los estudiantes presentes en las guías 1, 2 y 3, fueron codificadas mediante el libro de códigos y las relaciones de Thagard (tabla 11). A continuación, se presentan los resultados de los niveles de progresión alcanzados por los estudiantes y las relaciones entre conceptos evidenciadas en sus respuestas textuales.

Análisis de códigos.

Las respuestas textuales entregadas por los estudiantes en las guías 1, 2 y 3, fueron analizadas línea a línea en busca de frases con significado, a partir de lo cual se generó un listado de 16 códigos, y posteriormente se estableció la frecuencia general de cada código, lo que se presenta en la figura 3.

Al analizar las respuestas textuales de los estudiantes en las tres guías de trabajo, se determinó que los cinco códigos que más se repiten son: con una frecuencia de 12, “morfología celular” y “origen de la enfermedad”, seguidos de los códigos de “transporte de gases” y “hemoglobina anormal”, con una frecuencia de 11 y 10 respectivamente, y con una frecuencia de 9, el código “diagnóstico de la enfermedad” es uno de los más citados. Si nos aventuramos a clasificar o agrupar estos códigos en grandes categorías (categorías definidas a priori), se corresponden con los niveles de progresión de expresión fenotípica y célula.

Lo anteriormente señalado, se debe a que el contenido tratado en las tres actividades estaba relacionado con enfermedades de origen genético, importancia de las proteínas en la expresión genética y morfología celular, y en el transcurso de estas los estudiantes tuvieron que describir la morfología de un glóbulo rojo normal y un glóbulo rojo de la anemia falciforme, y las causas y consecuencias de esta enfermedad, además de analizar la formación de los eritrocitos o glóbulos rojos, para posteriormente relacionar este proceso con la enfermedad de anemia falciforme.

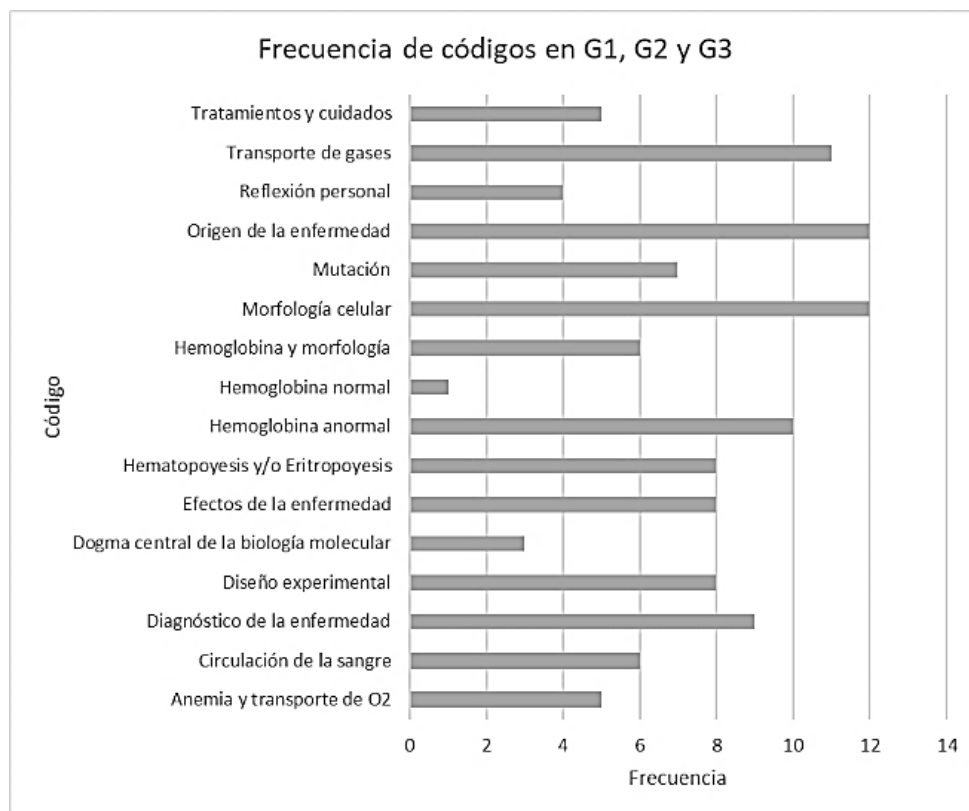


Figura 3: Frecuencia de códigos presentes en las respuestas de G1, G2 y G3 (Fuente autor)

Niveles de progresión.

Al momento de diseñar las actividades de esta SEA, se pensaron para que una vez desarrolladas cada una de ellas, pudieran dar cumplimiento o permitieran que los estudiantes pudieran superar los niveles de progresión propuestos, en este caso, nivel expresión fenotípica y nivel célula. Para evidenciarlo, se analizaron las respuestas textuales de los estudiantes y se analizaron para ver si daban cumplimiento a los objetivos propuestos en la tabla 10. En la tabla 13, se presenta una síntesis del nivel alcanzado por cada estudiante al dar cumplimiento con sus respuestas en diferentes preguntas de las tres actividades o guías de trabajo realizadas. En esta tabla se presentan los objetivos a alcanzar en los niveles de expresión fenotípica y célula, y en la columna “Respuestas de Estudiantes (...)”, se presenta para cada uno de ellos la codificación de la pregunta en la cual alcanzó ese objetivo. Al analizar el cumplimiento de los objetivos en las diferentes respuestas de los estudiantes, mediante el análisis textual de estas, se puede señalar que todos dieron cumplimiento a ellos, superando el nivel en el cual se enmarcaba la actividad, pero una sola estudiante no dio cumplimiento en una de las preguntas al objetivo relacionado con esta, lo que se debe a que la respuesta que da se relaciona con el área de la bioquímica, es decir, con un nivel molecular, haciendo alusión a un nivel superior, el cual se iba a tratar en otras actividades, es decir, en el nivel procesos moleculares, pero de igual forma alcanza a superar el nivel expresión fenotípica, al responder una siguiente pregunta, cumpliendo con el objetivo del nivel.

Tabla 13. Síntesis de los niveles alcanzados por cada estudiante, evidenciado mediante el logro de los objetivos (Fuente: Autor).

Nivel/ Activ	¿Cómo alcanzar este nivel?	Respuestas de Estudiantes en las cuales se da cumplimiento al objetivo				
		A1	A2	A3	A4	
Expresión fenotípica	Identificar que la finalidad de la expresión genética es determinar una característica.	G1.1E.A1	G1.1E.A2	G1.1E.A3	G1.1E.A4	
	Actividad 2 (guía 1)	Describir que las características son producidas por las proteínas, las cuales tienen funciones fisiológicas y estructurales.		G1.1D. A2	G1.1D. A3	G1.1D. A4
		Reconocer que la expresión genética determina el fenotípico, es decir, las características observables.	G1.1C2.A1	G1. 1C2.A2	G1. 1C2.A3	G1. 1C2.A4
Célula	Identificar las estructuras de la célula.	G1.1A. A1	G1.1A. A2	G1.1A.A3	G1.1A. A4	
		G1.1B2.A1	G1. 1B2.A2	G1. 1B2.A3	G1. 1B2.A4	
Célula	Identificar que en el ADN se encuentra la información genética (...)	G3. P5. A1	G3.P5.A2-A4	G3. P5. A3	G3. P5. A2-A4	
		G2.PII.	G2.PII.	G2.PII.	G2.PII.	
		2D1.A1	C2D1.A2	C2D1.A3	C2D1.A4	

Actividad 3 (guía 2)	Describir que muchas veces las proteínas son determinantes en el proceso de diferenciación celular (...)	G2.PII. C2A.A1	G2.PII. C2A. A2	G2.PII. C2A. A3	G2.PII. C2A. A4
		G2.PII. C2B.A1	G2.PII. C2B. A2	G2.PII. C2B. A3	G2.PII. C2B. A4
Actividad 4 (guía 3)		G2.PII. C2C.A1	G2.PII. C2C. A2	G2.PII. C2C. A3	G2.PII. C2C. A4
		G3. P6. LB. A1	G3. P6. LB. A2	G3. P6. LB. A3	G3. P6. LB. A4

Relaciones de Thagard

Luego de analizar las respuestas textuales de los estudiantes identificando las relaciones entre los diferentes conceptos, se procedió a elaborar los mapas Thagard para cada una de las guías de trabajo. Al analizar la frecuencia total de las relaciones presentes en las respuestas textuales de las tres guías, se evidencia que la relación entre los diferentes conceptos que más se repiten son las relaciones de propiedad y de ejemplo, la relación de propiedad indica, como lo señala su nombre, las propiedades de un objeto o cosa, en cambio, la relación de ejemplo, permite identificar los objetos que son utilizados como ejemplos de determinados conceptos.

La guía 1 titulada “¿Es la anemia falciforme una enfermedad hereditaria?”, tiene por objetivo definir conceptos claves que nos permitan entender la anemia falciforme, y en las respuestas de los estudiantes predomina la relación de propiedad con una frecuencia de 30 y en segundo lugar se presentan 12 relaciones de ejemplo; las relaciones de clases y regla, solamente se presentan con una frecuencia de 1 respectivamente, y no se evidencian en las respuestas de los cuatro estudiantes relaciones de partes. Por otro lado, en la guía 2 titulada “¿Cómo se forman los eritrocitos o los glóbulos rojos?”, la cual tiene por objetivo reconocer las estructuras celulares que participan en la formación de los glóbulos rojos, se evidencia que en las respuestas de los estudiantes (al igual que en la guía 1), predomina la relación de propiedad, con una frecuencia de 22, pero esta vez, en segundo lugar, predomina la relación de regla con una frecuencia de 9, en esta relación, se buscan expresar relaciones entre conceptos, lo cual se relaciona directamente con el objetivo de esta actividad. En tercer lugar, predomina la relación de ejemplo, seguida de la relación de clases con una frecuencia de 1, y en último lugar, están las relaciones de parte sin ningún representante.

Finalmente, la guía 3 titulada “¿Podrá la forma del glóbulo rojo ser importante para llevar a cabo su función?”, es un laboratorio virtual que tiene por objetivo que los estudiantes puedan identificar la forma que poseen los glóbulos rojos, se observa que en las respuestas de los estudiantes solo se reconoce la relación de propiedad, ya que, se entregan características de la morfología de estas células y los signos o síntomas que pueden ocasionar en la fisiología del cuerpo. Se puede deducir que predominan las relaciones de propiedad, debido a que se están solicitando características, estructuras celulares, estructuras moleculares, fenotipos, signos y síntomas de una enfermedad de origen genético, denominada anemia falciforme, lo

cual se corresponde con las relaciones de ejemplo y regla, dado que los estudiantes ejemplifican las propiedades entregadas o bien relacionan conceptos para fundamentar sus respuestas.

Análisis de la información.

Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), citan aspectos que los investigadores pueden considerar para poder aumentar la credibilidad en sus resultados, las cuales son: establecer estancias prolongadas en el campo, llevar a cabo muestreo dirigido o intencional y la triangulación (Creswell, 2013, Neuman, 2009 y Franklin y Ballau, 2005). Estos autores, señalan que en el caso de la triangulación esta se utiliza “para confirmar la corroboración estructural y la adecuación referencial” (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018:504). En este caso, se utilizará la triangulación de teorías, en la cual se define la teoría mediante la cual los datos serán analizados e interpretados para analizar y entender el fenómeno desde diferentes perspectivas y confrontando teorías (Okuda y Gómez-Restrepo, 2005) En el caso de esta investigación, las respuestas textuales de los estudiantes, de las guías 1, 2 y 3, fueron analizadas de acuerdo a las etapas del ciclo de aprendizaje ECBI y las diferentes acciones o habilidades a desarrollar en cada una de ellas; el avance en los niveles de progresión con los respectivos objetivos a cumplir y las relaciones entre los conceptos expuestas mediante los mapas de Thagard. Al analizar los diferentes datos obtenidos por las diferentes fuentes, se puede señalar en relación a:

- 1) **Niveles de progresión:** Los estudiantes pudieron superar los niveles de expresión fenotípica y célula, abordados en la guía 1, y en la guía 2 y 3 respectivamente, esto se vio evidenciado mediante el cumplimiento de los objetivos propuestos para cada uno de los niveles.
- 2) **Diseño metodológico:** Las guías fueron diseñadas mediante la metodología indagatoria, y para ver si cumplían con las características para las fases del ciclo ECBI en que iban a ser aplicadas, se siguieron los lineamientos propuestos por Escobar (2016), y posteriormente para las diferentes preguntas de las guías, se determinó la habilidad a desarrollar o la acción a realizar, para poder identificar en las respuestas textuales de las guías, si los estudiantes mediante sus respuestas escritas eran capaces de desarrollarlas.
- 3) **Relaciones entre conceptos:** Se determinó la relación entre los conceptos identificados en las respuestas textuales de las guías de trabajo, estas relaciones pueden ser de: regla, parte, propiedad, ejemplo y clase. Estas se determinaron mediante el análisis textual de las respuestas y tomando como referencia la Tabla 11 titulada “Ejemplos y representación de las relaciones en los mapas de Thagard”.

Al analizar los resultados obtenidos, nos permite evaluar el diseño de esta SEA, debido a que se puede observar que el nivel 1 titulado “expresión de la información genética,” se relaciona directamente con levantar las creencias o ideas previas en relación a la temática de expresión de la información genética, lo cual, además, se relaciona con las habilidades de tipo indagatoria de la fase de focalización del ciclo ECBI. Si ahora, relacionamos este diseño con las relaciones de los conceptos es esperable que predominen las relaciones de propiedad debido a que se están levantando ideas o características de un tema inicial, en este caso, una enfermedad genética; también predomina la relación de ejemplo, ya que los estudiantes deben

relacionar esta temática con una enfermedad, la cual es un tipo de enfermedad genética, aplicando ahí la relación de regla.

En el caso de las actividades 2 y 3, su diseño se basa en la fase de exploración del ciclo indagatorio, y a la vez, pertenecen al segundo nivel de progreso, denominado "nivel célula". al igual que en la guía 1, también se definieron los objetivos para este nivel y se revisaron las respuestas de los estudiantes para ver si mediante ellas se daba cumplimiento a estos, lo mismo se realizó en relación a si los estudiantes desarrollaban habilidades indagatorias de la fase exploratoria. Por su parte, las relaciones entre conceptos que predominan en las respuestas de los estudiantes son relaciones de regla, ejemplo y clase, pero la que más predomina es la de propiedad, debido a que, en este nivel y fase del ciclo, comienzan a desarrollarse y generarse nuevos conocimientos en relación a la temática a abordar, como por ejemplo, en este caso, se solicitan características de la morfología de células sanguíneas y los signos o síntomas que pueden ocasionar en la fisiología del cuerpo.

Conclusiones

Esta investigación, fue una Investigación Basada en el Diseño (IBD), mediante la cual se ideó una SEA sobre la noción científica de expresión de la información genética, en la cual se evaluó su validez, su diseño metodológico y la forma de enseñar este contenido. Debido a que el problema que desencadenó esta investigación, es que este contenido se enseña mediante clases expositivas y utilizando esquemas con lenguaje simbólico, por lo que en esta propuesta de SEA, el contenido fue enseñado mediante indagación científica utilizando el ciclo de aprendizaje ECBI (focalización, exploración, reflexión y aplicación). Esta metodología, permite que los estudiantes pongan en práctica en el aula la indagación, que es propia de la ciencia, lo cual les permite realizar un aprendizaje activo, junto con adquirir nuevo conocimiento, desarrollar habilidades científicas y actitudes científicas, además, de comprender contenidos e ideas científicas, que giran en torno a una pregunta de investigación, la cual se toma como punto de partida para los procedimientos o pasos a seguir, y que las explicaciones o conclusiones propuestas tienen que ser acordes con los datos o información obtenida (Vergara y Cofré, 2012).

En el caso de la aplicación de esta SEA, los cuatro estudiantes que participaron pudieron desarrollar habilidades de indagación relacionadas preferentemente con las fases de focalización y exploración del ciclo de aprendizaje ECBI. Los estudiantes pudieron desarrollar, en la fase de focalización, habilidades relacionadas con identificar estructuras de acuerdo a sus conocimientos previos, conocer sus ideas previas sobre la temática, proponer ideas de cómo se podría diagnosticar una enfermedad, extraer información de un texto para contrastar sus ideas iniciales y plantear hipótesis. En las actividades de exploración, desarrollaron capacidades para diseñar procedimiento experimental, comprobar procedimiento experimental, sintetizar información y relacionar la información presentada con la evidencia obtenida.

Además, esta SEA permitió explorar los aprendizajes alcanzados por los estudiantes en relación a esta noción científica, los cuales se relacionan directamente con las ideas sobre enfermedades genéticas que ellos poseen, junto con los criterios para considerar que una enfermedad es de origen genético. Entre las ideas que poseen los estudiante en relación a esta

temática, se destacan aquellas que se relacionan principalmente con la forma en que se diagnostica este tipo de enfermedades, la forma en cómo se heredan y el origen a nivel genético de estas, ideas que se relacionan directamente con los criterios utilizados por los estudiantes para considerar que una enfermedad es de origen genético, entre los que se destacan su origen (mutación genética heredada de los progenitores), estructura molecular en la que ocurre la mutación que se expresará en el fenotipo.

Al mismo tiempo que se analizaban las respuestas textuales de los cuatro estudiantes, se lograron identificar las relaciones propuestas por Thagard (1992). Entre los conceptos utilizados al responder sobre esta temática, se evidencia que la relación entre ellos que más se repiten son las relaciones de propiedad y de ejemplo; la relación de propiedad indica, como lo señala su nombre, las propiedades de un objeto o cosa, en cambio, la relación de ejemplo permite identificar los objetos que son utilizados como ejemplos de determinados conceptos. Se puede deducir que predominan las relaciones de propiedad, debido a que se están solicitando características, estructuras celulares, estructuras moleculares, fenotipos, signos y síntomas de una enfermedad de origen genético, denominada anemia falciforme, que se corresponde con las relaciones de ejemplo y regla, dado que los estudiantes ejemplifican las propiedades entregadas o bien relacionan conceptos para fundamentar sus respuestas.

Limitaciones del estudio

La principal limitación que tuvo la implementación de esta investigación es que las clases en los diferentes establecimientos educacionales durante el año escolar 2020, se tuvieron que realizar de manera online, con instancias de trabajo sincrónico y asincrónico, debido a la pandemia de COVID-19 que, desde diciembre de 2019 hasta hoy, inicios de 2021 nos está afectando. La modalidad de trabajo online trajo el gran desafío de adaptar las actividades que estaban diseñadas para ser aplicadas de manera presencial, para ser desarrolladas de forma online, muchas de las cuales no pudieron ser ejecutadas del modo esperado.

Otra limitación importante a considerar, es que en el establecimiento educacional donde se aplicó esta SEA, las clases sincrónicas de los electivos, como es en este caso, el de biología celular y molecular, se realizaron cada tres semanas, lo cual, provocó que solo se pudieran aplicar tres de las ocho actividades que forman parte de esta SEA, hecho que me permitió solamente levantar datos relacionados con los aprendizajes de enfermedades de origen genético. Además, es necesario señalar, que se le pidió colaboración y se conversó con el grupo de 25 estudiantes que forman parte de este electivo para poder trabajar con sus respuestas textuales, pero solamente cuatro estudiantes desearon participar de manera voluntaria.

Agradecimientos: Este trabajo se hace parte del Proyecto Fondecyt 1180619, financiado por la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) del Gobierno de Chile.

Bibliografía

Abarca, C., Caro, A., Fernández, D., Flores, S., Lepe, C., Pepper, L. y Poblete, E. (2012). *Biología 3° y 4° medio*. Chile: Santillana, 155 – 156.

- Ageitos, N., y Puig, B. (2016). Modelizar la expresión de los genes para el aprendizaje de enfermedades genéticas en secundaria. *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências*, 18(1), 65-84. <https://doi.org/10.1590/1983-21172016180104>
- Agorram, B., Clement, P., Selmaoui, S., Khzami, S., Chafik, J., y Chiadli, A. (2010). University students' conceptions about the concept of gene: Interest of historical approach. *US-China Education Review*, 7 (2), 9 - 15. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01024976/document>
- Anderson, T., y Shattuck, J. (2012). Design-Based Research: A Decade of Progress in Education Research? *Educational Researcher*, 41(1), 16–25. <https://doi.org/10.3102/0013189X11428813>
- Audesirk, T., Audesirk, G. y Byers, B. (2008). *Biología. La vida en la Tierra*. México. Pearson Education.
- Ayuso, G. y Banet, E. (2002). Alternativas a la enseñanza de la genética en educación secundaria. *Enseñanza de las ciencias*, 20(1), 133-157. <https://core.ac.uk/download/pdf/38990692.pdf>
- Boerwinkel, D, Yarden, A., y Waarlo, A. (2017). Reaching a consensus on the definition of genetic literacy that is required from a twenty-first-century citizen. *Science & Education*, 26(10), 1087-1114. <https://doi.org/10.1007/s11191-017-9934-y>
- Brown, G. (2008). Acercamiento al aula del tema de conservación de la biodiversidad: El caso de la flora nativa de la Región de Atacama y de los sitios prioritarios para su conservación. En: *Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: Región de Atacama*, 371-386. http://www.biouls.cl/lrojo/lrojo03/public_html/libro/22.pdf
- Campbell, N. y Reece, J. (2007). *Biología*. México: Editorial Médica Panamericana.
- Chattopadhyay, A. (2005). Understanding of genetic information in higher secondary students in northeast India and the implications for genetics education. *Cell Biology Education*, 4(1), 97-104. <https://doi.org/10.1187/cbe.04-06-0042>
- Couso, D. (2012). Las secuencias didácticas en la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias: modelos para su diseño y validación. En: *Didáctica de la física y la química*, 57-84. <https://tinyurl.com/yykq9t78>
- de Benito, B., e Ibáñez, J. (2016). La investigación basada en diseño en Tecnología Educativa. *Revista Interuniversitaria de Investigación en Tecnología Educativa*. 44-59. <https://revistas.um.es/riite/article/view/260631/195691>
- Devés, R., y Reyes, P. (2007). Principios y estrategias del Programa de Educación en Ciencias Basada en la Indagación (ECBI). *Revista Pensamiento Educativo*, 41(2), 115-131. <https://pensamientoeducativo.uc.cl/files/journals/2/articles/419/public/419-936-1-PB.pdf>
- Díaz, L., González, A., y Ramos, C. (2018). *Diseño de una secuencia didáctica para la enseñanza del concepto de expresión génica centrada en el fortalecimiento de la competencia uso comprensivo del conocimiento científico* [tesis de máster, Universidad del Norte, Colombia]. Repositorio Institucional Universidad del Norte. <http://manqlar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/7960/131414.pdf?sequence=1>
- Dyasi, H. (2014). Enseñanza de la ciencia basada en la indagación: razones por las que debe ser la piedra angular de la enseñanza y aprendizaje de la ciencia. En: Dyasi, H., Harlen, W., Figueroa, M., Léna, P., y López, P. *La Enseñanza de la Ciencia en la Educación Básica. Antología sobre Indagación*. México, D.F., 9-18. <https://innovec.org.mx/home/images/antologia%20sobre%20indagacion-vol.1.pdf>
- Etobro, A., y Banjoko, S. (2017). Misconceptions of genetics concepts among pre-service teachers. *Global Journal of Educational Research*, 16(2), 121-128. <http://dx.doi.org/10.4314/gjedr.v16i2.6>

- Escobar, M. (2016). *Estudio acerca de habilidades asociadas a la competencia indagar en biología en el marco de la enseñanza de las ciencias basada en la indagación* [tesis de máster, Universidad de La Sabana, Colombia]. Repositorio Intellectum. <https://intellectum.unisabana.edu.co/bitstream/handle/10818/25930/Mar%c3%ada%20Rubb%20Escobar%20G%20c3%b3mez%28Tesis%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Flick, U. (2012). *Introducción a la investigación cualitativa*. Madrid: Morata.
- Flores, A. (2018). *Propuesta didáctica basada en el constructivismo para el aprendizaje del ADN, ARN y la biotecnología* [tesis de máster, Universidad de Almería, España]. Repositorio UAL. <https://tinyurl.com/y5pa7ma1>
- Fonseca, J. (2007). Modelos cualitativos de evaluación. *Educere*, 11(38), 427-432. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=35603807>
- Harlen, W. (2010). *Principios y grandes ideas de la educación científica*. Association for Science Education <https://tinyurl.com/yxq9ssre>
- Hernández-Sampieri, R., y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación* (Vol. 4). México: McGraw-Hill Interamericana. <https://tinyurl.com/y6bq5wrp>
- Íñiguez, F. y Puigcerver, M. (2013). Una propuesta didáctica para la enseñanza de la genética en la Educación Secundaria. *Revista eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias*, 307-327. http://dx.doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2013.v10.i3.02
- Jago, H. (2017). Analysis of Genetic Misconceptions Student Biology Education at STKIP Persada Khatulistiwa Sintang. *International Conference on Education (ICE2) 2018: Education and Innovation in Science in the Digital Era*, 369-375. <https://pdfs.semanticscholar.org/f0ec/a55d6dfa6a5a2df83f34112991fa508f7ddb.pdf>
- Jalmo, T., y Suwandi, T. (2018). Biology education students' mental models on genetic concepts. *Journal of Baltic Science Education*, 17(3), 474-485. http://www.scientiasocialis.lt/jbse/files/pdf/vol17/474-485.Jalmo_JBSE_Vol.17_No.3.pdf
- LaTorre, M. (2014). Mapas de progreso del aprendizaje (MPA) y rutas de Aprendizaje (RA) en Perú-2013. *Revista de Investigación en Psicología*, 16(1), 211-231. <https://doi.org/10.15381/rinvp.v16i1.3928>
- Marzábal, A., e Izquierdo, M. (2017). Análisis de las estructuras textuales de los textos escolares de química en relación a su función docente. *Enseñanza de las ciencias*, 35(1), 111-132. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.1951>
- Mills, K., Van Horne, K., Zhang, H., y Boughman, J. (2008). Essay contest reveals misconceptions of high school students in genetics content. *Genetics*, 178(3), 1157-1168. <https://doi.org/10.1534/genetics.107.084194>
- Ministerio de Educación (2016). Programa de Estudio de Biología Cuarto Medio. Unidad de Currículum y Evaluación. Santiago de Chile, Chile. https://currículumnacional.mineduc.cl/614/articles-34454_programa.pdf
- Ministerio de Educación (2016). Programa de Estudio de Biología Tercero Medio. Unidad de Currículum y Evaluación. Santiago de Chile, Chile. <https://educrea.cl/programa-de-estudio-biologia-3-medio/>
- Ministerio de Educación (2017). Programa de Estudio de Ciencias Naturales Eje de Biología Primero Medio. Unidad de Currículum y Evaluación. Santiago de Chile, Chile. https://currículumnacional.mineduc.cl/614/articles-34456_programa.pdf
- Ministerio de Educación (2018). Programa de Estudio de Ciencias Naturales Eje de Biología Segundo Medio. Unidad de Currículum y Evaluación. Santiago de Chile, Chile. https://currículumnacional.mineduc.cl/614/articles-34453_programa.pdf

- Ministerio de Educación (2019). Bases Curriculares de 3° y 4° medio. Unidad de Currículum y Evaluación. Santiago de Chile, Chile. https://currículumnacional.mineduc.cl/614/articles-91414_bases.pdf
- Ministerio de Educación (2020a). Programa Asignatura Biología Celular y Molecular Tercero y Cuarto medio. Unidad de Currículum y Evaluación. Santiago de Chile, Chile. https://currículumnacional.mineduc.cl/614/articles-140138_programa.pdf
- Ministerio de Educación (2020b). Programa Asignatura Biología de los Ecosistemas Tercero y Cuarto medio. Unidad de Currículum y Evaluación. Santiago de Chile, Chile. https://currículumnacional.mineduc.cl/614/articles-140136_programa.pdf
- Ministerio de Educación (2020c). Programa Asignatura Ciencias de la Salud Tercero y Cuarto medio. Unidad de Currículum y Evaluación. Santiago de Chile, Chile. https://currículumnacional.mineduc.cl/614/articles-140139_programa.pdf
- Perales, F. y Jiménez, J. (2002). Las ilustraciones en la enseñanza-aprendizaje de las ciencias. Análisis de libros de texto. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 20(3), 369-386. <https://www.raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/21826/21660>
- Okuda, M., y Gómez-Restrepo, C. (2005). Métodos en investigación cualitativa: triangulación. *Revista colombiana de psiquiatría*, 34(1), 118-124. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=80628403009>
- Programa ECBI•Chile. (sf). Método Indagatorio. <http://www.ecbichile.cl/home/metodo-indagatorio/>
- Rosenberg, C. (2014). *Estrategias para mejorar la comprensión del proceso de replicación del ADN en alumnos de la Escuela Secundaria* [tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio Memoria Académica de la FAHCE. <http://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/tesis/te.991/te.991.pdf>
- Sepúlveda, S. (2017). Caracterización del contenido de célula en textos escolares de biología de enseñanza secundaria de Chile. *Revista de Innovación en Enseñanza de las Ciencias*, 1(2), 29-52. <http://www.reinnec.cl/index.php/reinnec/article/view/21>
- Thagard, P. (1992). Conceptual revolutions. In K. Tobin y D. Tippin (eds.). *Constructivism as a referent for teaching and learning*. Princeton: Princeton University Press. <https://tinyurl.com/y52e3jvq>
- Valverde-Berrocoso, J. (2016). La investigación en Tecnología Educativa y las nuevas ecologías del aprendizaje: Design-Based Research (DBR) como enfoque metodológico. *RIITE. Revista Interuniversitaria de Investigación en Tecnología Educativa*, 60-73. <http://dx.doi.org/10.6018/riite/2016/257931>
- Vergara, C., y Cofré, H. (2012). La indagación científica: un concepto esquivo, pero necesario. *Revista chilena de educación científica*, 11(1), 30-38. <https://tinyurl.com/y3paeuhy>
- Weber, C. (2016). Beyond the cell: Using multiscale topics to bring interdisciplinarity into undergraduate cellular biology courses. *CBE—Life Sciences Education*, 15(2), 1-11. <https://doi.org/10.1187/cbe.15-11-0234>