

¿Se deben incorporar los nuevos avances científicos al currículo de la Educación Secundaria para conseguir una alfabetización científica del alumnado?

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN PROFESORADO DE EDUCACIÓN SECUNDARIA

Curso 2017/2018

Autora: Maitane Guardia

Tutora: María Isabel Zudaire

upna
Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

RESUMEN

Los trabajos de investigación en didáctica de la genética han demostrado el bajo conocimiento popular y escolar sobre contenidos científicos actuales. Múltiples propuestas han sido enfocadas desde una perspectiva de ciencia, tecnología y sociedad, cuyo objetivo es conseguir una alfabetización científica de todo el alumnado para potenciar la formación de ciudadanos críticos, capaces de tomar decisiones sobre temas científicos.

Dado que los conocimientos básicos de genética se adquieren principalmente durante la Educación Secundaria, en este trabajo se ha planteado la posibilidad de introducir en la enseñanza de esta etapa los nuevos avances científicos para alcanzar una alfabetización científica de los alumnos. Para ello hemos observado en primer lugar, que los contenidos curriculares no incluyen de manera desarrollada las nuevas tecnologías, sus técnicas y sus posibles cuestiones éticas. En los libros de texto, técnicas como clonación y secuenciación del genoma son citados brevemente, pero la innovadora técnica de edición genómica apenas aparece en las editoriales. Tras la realización de un test previo en alumnos de diferentes edades e itinerarios, hemos constatado las grandes dificultades que presentan para entender la organización del material genético y la poca capacidad de establecer un juicio crítico en alumnos de itinerarios no científicos.

En segundo lugar, tras una intervención en el aula basada en el aprendizaje por argumentación, hemos comprobado que los contenidos relativos a la genética y en concreto a las nuevas tecnologías pueden ser asimiladas por los alumnos de Bachillerato y favorecen la adquisición de conocimientos actitudinales ante cuestiones bioéticas.

En conclusión, consideramos que la introducción de nuevos avances científicos en la Enseñanza Secundaria es posible, siendo su presencia necesaria por su papel crucial en la salud y en el desarrollo del juicio crítico.

FIGURAS

Figura 1. Técnica de secuenciación del genoma	12
Figura 2. Esquema clonación genética , terapéutica y reproductiva	14
Figura 3. Diferencia entre clonación por transferencia nuclear y el proceso de fecundación ...	15
Figura 4. Esquema del sistema CRISPR basado en la Cas9 y sus principales aplicaciones	17
Figura 5. Esquema del planteamiento seguido para la propuesta didáctica	30
Figura 6. Pirámide de conocimientos de genética necesarios para comprender las técnicas de clonación, secuenciación y edición del genoma	31
Figura 7. Porcentaje de alumnos para cada curso en dos de las cuestiones de la pregunta 5... 42	42
Figura 8. Porcentaje de alumnos para cada curso en dos de las cuestiones de la pregunta 5... 42	42
Figura 9. Porcentaje de alumnos para cada curso en dos de las cuestiones de la pregunta 5.. 43	43
Figura 10. Porcentaje de alumnos de cada uno de los grupos con respuestas correctas, incorrectas o de duda ante los diferentes ítems.....	45
Figura 11. Porcentaje de alumnos para cada una de las preguntas de la prueba de compatibilidad.....	50
Figura 12. Modelo argumentativo de Toulmin	52
Figura 13. Ejemplo de respuestas para la construcción de argumentos sobre clonación	55
Figura 14. Ejemplo de respuestas para la construcción de argumentos sobre CRISPR y su técnica de edición genómica.....	55
Figura 15. Ejemplo de respuestas para la construcción de argumentos sobre secuenciación genómica	55
Figura 16. Respuestas de cambio de opinión respecto a determinados avances científicos	57
Figura 17. Diferencia entre las respuestas iniciales y finales sobre clonación.....	58
Figura 18. Diferencia entre las respuestas iniciales y finales sobre secuenciación del genoma.	59
Figura 19. Diferencia entre las respuestas iniciales y finales sobre edición del genoma	59

TABLAS

Tabla 1. Análisis del currículo de 4° de la ESO de la LOMCE. Modificado con el DF 24/2015 y DF 25/2015	22
Tabla 2. Análisis del currículo de Bachillerato de la modalidad de Ciencias de la Salud de la LOMCE. Modificado con el DF 24/2015 y DF 25/2015.....	23
Tabla 3. Análisis del currículo de Bachillerato de la modalidad de Artes, Humanidades y Ciencias Sociales de la LOMCE. Modificado con el DF 24/2015 y DF 25/2015	24
Tabla 4. Libros de texto analizados	27
Tabla 5. Libros de texto de 2° de Bachillerato analizados, clasificados según la editorial y los ítems a estudiar.....	29
Tabla 6. Mayoría de alumnos de cada uno de los grupos que asocia clonación como una técnica peligrosa, necesaria y factible	34
Tabla 7. Mayoría de alumnos de cada uno de los grupos que asocia la secuenciación genómica como una técnica peligrosa, necesaria y factible	35
Tabla 8. Mayoría de alumnos de cada uno de los grupos que asocia edición genómica como una técnica peligrosa, necesaria y factible	35
Tabla 9. Porcentaje de alumnos de cada uno de los tres grupos que justifica sus respuestas atendiendo a los criterios comunes establecidos.....	37
Tabla 10. Porcentaje de alumnos de cada uno de los tres grupos que identifica la presencia de elementos en cada tipo celular	40
Tabla 11. Porcentaje de alumnos de cada uno de los grupos de 1° de Bachillerato en las preguntas 3 y 4.....	41
Tabla 12. Porcentaje de alumnos de los grupos del itinerario Científico en las preguntas 3 y 4	41
Tabla 13. Distribución de las cinco sesiones desarrolladas en 2° de Bachillerato	47
Tabla 14. Justificaciones de los alumnos de 2° bachillerato en los test iniciales y finales.....	60
Tabla 15. Porcentaje de alumnos de 2° de Bachillerato con respuestas correctas, incorrectas o de duda ante los diferentes ítems.....	62
Tabla 16. Porcentaje de alumnos de 2° de Bachillerato que identifica la presencia de elementos en cada tipo celular	97
Tabla 17. Porcentaje de alumnos de 2° de Bachillerato en el test inicial y final a las preguntas 3 y 4	97
Tabla 18. Porcentaje de alumnos de 2° de Bachillerato que asocia cada ejemplo con características influidas por factores genéticos, ambientales o por modulación.....	97

INDICE

Introducción	5
Alfabetización científica	5
Aprendizaje basado en la argumentación.....	6
Didáctica de la genética	7
Ideas alternativas sobre genética	8
Contenidos en genética.....	9
Genoma	9
Secuenciación del genoma.....	10
Clonación.....	13
Edición del genoma	16
Objetivos	19
Metodología	20
Análisis del currículo de la Educación Secundaria.....	20
Análisis de los libros de texto de la Educación Secundaria	27
Propuesta didáctica.....	30
Diseño del cuestionario previo sobre genética	32
Desarrollo del aprendizaje basado en la argumentación en ciencias	47
Conclusiones	63
Bibliografía	65
Anexos	69
Anexo 1: Cuestionario previo sobre genética	69
Anexo 2: Diapositivas sesiones 2° de Bachillerato	72
Anexo 3: Guion para la simulación de mutaciones puntuales	89
Anexo 4: Prueba de compatibilidad	91
Anexo 5: Material para defender posturas sobre las teorías evolucionistas.....	92
Anexo 6: Material complementario para trabajo cooperativo	94
Anexo 7: Construcción de argumentos para el debate.....	96
Anexo 8: Resultados análisis test final	97

Introducción

En la sociedad actual se están produciendo grandes avances tecnológicos y científicos a diario, por lo que la educación debe alinearse con esta realidad y potenciar la formación de ciudadanos críticos sobre estos temas. Así, en los últimos años se ha producido un desarrollo en el currículo de Ciencias enfocado desde una perspectiva de ciencia, tecnología y sociedad, cuyo objetivo es proporcionar una cultura científica de todo el alumnado (Fernandes, Pires, & Villamañán, 2014).

Se está produciendo el avance de ciertas áreas, que inicialmente tienen que llegar a la legislación, a los libros de texto, y al conocimiento del profesorado, para poder así, llegar al aula. La genética es una de estas áreas que constantemente aparece en las noticias por sus nuevos descubrimientos; la terapia génica, los transgénicos, aspectos de biomedicina y biotecnología, clonación e ingeniería genética. La dificultad de la transposición didáctica de estos contenidos hace que estos nuevos avances no siempre lleguen al aula.

Este trabajo tiene como objetivo conocer el grado de conocimiento científico que tiene el actual alumnado sobre los nuevos avances de la genética, en concreto sobre secuenciación y edición genómica, y clonación, qué contenidos sobre esta área aparecen en el currículo de la ley vigente, en los libros de texto de la Educación Secundaria, así como analizar su capacidad de argumentación.

Alfabetización científica

La Ciencia es un importante elemento dinamizador de la sociedad, formando parte de la cultura y relacionándose estrechamente con el modelo social (Pujol, 2002). El currículo de ciencias está diseñado para cubrir dos necesidades básicas (Cañal et al., 2010): por una parte proporcionar a todo el alumnado una cultura científica que les permita integrarse en una sociedad cada vez más científica y tecnológica, así como, proporcionar a aquellos estudiantes que van a continuar sus estudios de ciencias, las bases para su futura formación. La primera de estas finalidades hace referencia al concepto de alfabetización científica, que puede ser útil para el desarrollo de un currículo de ciencias equilibrado, que compagine la preparación de algunos estudiantes para futuras profesiones científicas y tecnológicas con una formación científica para el conjunto de la población (Membiela, 2002).

A lo largo de los últimos años se han producido numerosos estudios sobre la formación científica de los ciudadanos a través de cuestionarios realizados a gran escala para medir las actitudes y la comprensión de la ciencia en países como EEUU y Gran Bretaña (Membiela,

2002). Las conclusiones de estas investigaciones tuvieron un gran eco social, ya que determinaron, sin tener en cuenta el contexto social, que el 90 % de la población se podía considerar como científicamente analfabeta.

Existen numerosas definiciones del concepto “alfabetización científica” ya que ésta engloba diversos comportamientos, conocimientos, habilidades intelectuales y predisposiciones (Cañal et al., 2010). Para algunos autores se define como la capacidad de aplicar adecuadamente el conocimiento científico, resolución de problemas y toma de decisiones a los asuntos personales, cívicos y profesionales. Otros, hacen referencia a la habilidad y la inclinación para continuar aprendiendo ciencia a lo largo de la vida. Para otros autores, la alfabetización científica incluye adquirir conocimientos científicos y desarrollar habilidades intelectuales (Membiela, 2002).

En la actualidad, el problema reside en que la educación científica está centrada en el estudio meramente memorístico de conceptos, principios, leyes y teorías que resultan de escasa utilidad para la vida cotidiana y para el logro de una alfabetización científica escolar (Cañal et al., 2011). En la actualidad existe la necesidad de conocer información científica para el planteamiento de ciertos aspectos del día a día, para tener la capacidad de debatir públicamente sobre asuntos importantes relacionados con los nuevos avances de la ciencia y tecnología, e incluso para compartir la emoción y realización personal que puede producir la comprensión del mundo natural.

Aprendizaje basado en la argumentación

Los modelos de enseñanza de las ciencias han experimentado grandes cambios en la última década, intentando abandonar el modelo de enseñanza por transmisión proponiendo alternativas como el aprendizaje por descubrimiento o el aprendizaje basado en la argumentación (Iñiguez & Puigcerver, 2013).

La argumentación se pone en práctica en clase de ciencias cuando se les propone a los estudiantes la resolución de problemas auténticos o cuando se les da la oportunidad de discutir problemas relevantes para ellos (Jiménez, 1998). Por argumentación se entiende la capacidad de relacionar datos y conclusiones, de evaluar enunciados teóricos a la luz de los datos empíricos o procedentes de otras fuentes.

Si partimos de esta idea, la argumentación cobra gran relevancia en el área de las Ciencias. Por un lado, hacer ciencia implica discutir, razonar, argumentar, criticar y justificar ideas y explicaciones, y por otro lado, enseñar y aprender ciencias requiere de estrategias

basadas en el lenguaje, es decir, el aprendizaje es un proceso social. Según otros estudios, se reconoce una estrecha relación entre las competencias comunicativas y el aprendizaje de los modelos científicos y se afirma que una mejora de dichas competencias corresponde a un aprendizaje de mayor calidad, porque aprender a pensar, es aprender a argumentar (Henaó & Stipcich, 2008).

En el marco de estas dos perspectivas se ha consolidado la idea de que la argumentación juega un papel determinante en las formas de como los estudiantes construyen comprensiones y concepciones acerca del conocimiento científico escolar. En este ámbito hay diversidad de respuestas a preguntas argumentativas que no pueden ser saturadas por un sí/no, o por una justificación basada únicamente en la información recibida (Plantín, 2010). Por ello, es necesario contar con profesores de ciencias que desde su formación inicial reconozcan la importancia de la argumentación y así mismo, diseñen e implementen en sus prácticas profesionales, metodologías novedosas que hagan de la argumentación, lo que Plantín (2009) denomina un medio de aprendizaje.

Expertos como Osborne, Eduran y Simon (2004), recalcan la importancia de llevar a las clases de ciencias las cuestiones éticas que se dan en el ámbito de la genética. Se busca priorizar el razonamiento, en tanto que la participación en debates implica tomar posturas argumentadas, es decir, justificación y respaldación de las afirmaciones.

El razonamiento argumentativo es relevante para la enseñanza de las ciencias, ya que uno de los fines de la investigación científica es la generación y justificación de enunciados y acciones encaminadas a la comprensión de la ciencia. Para poder construir modelos, explicaciones del mundo científico, los estudiantes necesitan, además de aprender significativamente los conceptos implicados, desarrollar la capacidad de escoger entre distintas opciones o explicaciones y de razonar los criterios que permiten evaluarlas.

Didáctica de la genética

El aprendizaje de las ciencias, en especial los contenidos sobre genética, presentan numerosas dificultades para los estudiantes, y en muchas ocasiones esto produce el desinterés de los alumnos (Solbes, 2007). Una de las principales causas de esa dificultad es la abstracción que requiere el aprendizaje de numerosos conceptos de esta disciplina.

En la actualidad existe una gran controversia entre distintos autores sobre la edad idónea para introducir conceptos de genética (Bugallo, 1995; Márquez, Roca, & Sanmartí, 2009). En otros países, como EEUU, estos contenidos se imparten a partir de los 12 años. Sin

embargo, en España no es hasta los 15 años cuando se introduce la asignatura (4° de ESO), momento en el que muchos de los estudiantes ya han elegido otros itinerarios no científicos, sin contenidos sobre genética en su currículo, lo que implica que no recibirán instrucción sobre esta materia en el transcurso de su escolarización en la Educación Secundaria.

Ideas alternativas sobre genética

El aprendizaje significativo en ciencias necesita un previo análisis de las concepciones que los alumnos presentan previo a la instrucción. En la última década se han publicado un gran número de trabajos dirigidos al análisis de estas ideas previas dentro del contexto de la genética (Iñiguez & Puigserver, 2013; Ruiz et al., 2017; Caballero, 2008). En la mayoría de ellos aparecen las ideas más comunes en el alumnado, las cuales son:

- No todos los seres vivos están formados por células.
- No entienden la relación entre organismo, célula, núcleo, cromosoma, gen y ADN.
- Identifican los genes con pequeñas partículas que contienen un rasgo o característica en miniatura y creen que no todos los seres vivos tienen cromosomas y genes.
- Confunden el término “información genética”. En ocasiones creen que cada tipo celular contiene únicamente la información genética necesaria para realizar su función.
- La información hereditaria solo está presente en las células sexuales.
- Creen que un mayor parecido a un progenitor se debe a más cantidad de información hereditaria del mismo o que ciertas características las aportan los genes de un progenitor y otras, los genes del otro.
- Sólo tienen en cuenta el dogma central de la Biología; un gen determina una proteína. No consideran que el ambiente influye en el fenotipo.
- No comprenden los procesos de mitosis y meiosis.
- Relacionan las mutaciones con cambio físico o transformación anatómica, es decir, algo visible, lo que además les lleva a pensar que es siempre algo negativo. Tampoco relacionan las mutaciones como mecanismo fundamental de la evolución de las especies.

Para algunos autores, los libros de texto pueden causar o reforzar los errores de los alumnos. Así, Cho, Kahle y Nordland (1985) destacan que los manuales de enseñanza secundaria: a) no relacionan adecuadamente genética y meiosis; b) tampoco establecen una relación clara entre algunos conceptos básicos (alelo, gen, ADN, cromosoma y carácter); c) utilizan términos de forma confusa (alelo, gen, mutación); d) no tienen en cuenta la dificultad

en el empleo de algunos elementos matemáticos e) no siguen una secuencia adecuada en la presentación de los contenidos (Banet & Ayuso, 1995).

La secuenciación de los contenidos, el lenguaje utilizado en los libros o sus representaciones gráficas, pueden ser el origen de concepciones erróneas de los estudiantes (González & Tamayo, 2000). Los libros de texto o de estudio suelen guiar el currículum escolar y continúan siendo la herramienta más usada por el profesorado, por ello es lógico que se investigue en la mejora de los mismos para favorecer el aprendizaje significativo.

Uno de los problemas principales de los libros de texto es no abordar el determinismo genético, lo que dificulta la comprensión de la influencia del ambiente en el fenotipo (Ruiz et al., 2017). El salto entre la proteína y el fenotipo está obviado en la mayor parte de las clases de genética y libros de texto, lo que aumenta el grado de complejidad para los alumnos de relacionar conceptos de diferentes niveles organizativos, y la comprensión del efecto del mundo microscópico en los procesos de herencia al nivel macroscópico (Tibell & Rundgren, 2010). Este último aspecto impide que los alumnos relacionen estos efectos en la evolución a través de los cambios o las mutaciones (Iñiguez & Puigcerver, 2013).

Contenidos en genética

Genoma

La genómica moderna permite actualmente el estudio del DNA a escala celular, desde los genes individuales hasta el complemento genético completo de un organismo, su genoma. El genoma es el conjunto de genes y otras secuencias no codificantes de un organismo donde se almacena la información biológica (Herráez & Sánchez, 2012).

La mayoría de organismos poseen un genoma constituido por DNA, pero algunos virus tienen RNA (Nelson & Cox, 2008). En el genoma de eucariotas se distingue entre el genoma nuclear y el de orgánulos como las mitocondrias o cloroplastos. El genoma nuclear presenta 2 formas en su ciclo celular: cromatina y cromosomas. Ambas están formadas por las mismas moléculas lineales largas de DNA bicatenario, asociado estrechamente a proteínas. En el caso del genoma de procariontes está reducido a un único cromosoma formado por una molécula de DNA circular, localizado en el citosol, pero anclado a la membrana constituyendo el nucleoide (Nelson & Cox, 2008).

Secuenciación del genoma

El genoma contiene las instrucciones para producir las proteínas de nuestro organismo, además de sintetizar otros elementos reguladores de su síntesis. Su secuenciación revela el orden de nucleótidos de un gen, al igual que las letras del alfabeto en las palabras. Por tanto, su estudio implica no solo descifrar dicha secuencia, sino además conocer la localización de los genes en los cromosomas.

A finales de la década de 1980, surgió la iniciativa internacional para secuenciar el genoma humano, El Proyecto Genoma Humano (Herráez & Sánchez, 2012). Al principio, la secuenciación de un genoma de 3×10^9 pares de bases parecía una tarea irrealizable, pero poco a poco, los avances tecnológicos lo hicieron posible. El primer científico que desarrolló una técnica para poder leer nuestra información genética fue Frederick Sanger, Premio Nobel de Química en dos ocasiones, siendo la cuarta persona en el mundo en conseguirlo tras Marie Curie, Linus Pauling y John Bardeen. En 1975, en la Universidad de Cambridge, Sanger desarrolló un método que consistía en copiar el proceso natural de replicación del ADN, utilizando el mecanismo de síntesis de ADN por las ADN polimerasas (García, 2010).

La secuenciación completa del genoma humano se completó en 2003; el proceso fue costoso, se emplearon cuatro años para secuenciar los mil primeros millones de pares de bases, pero sin embargo, las mejoras tecnológicas permitieron que en solo cuatro meses se secuenciaran los mil millones de bases restantes (Nelson & Cox, 2008). El método de trabajo de la genómica actual se basa en la secuenciación automática por medio de sistemas robotizados, pero cuyo fundamento está basado en el método de Sanger.

Así, se han desarrollado técnicas de secuenciación masiva, más conocidas en inglés como *Next Generation Sequencing* (NGS), las cuales permiten secuenciar millones de fragmentos de ADN de forma paralela un precio más barato por número de base (García, 2010). La secuenciación del método de Sanger se basa en la polimerización del ADN y el uso de dideoxinucleótidos que sirven como terminadores de la reacción. En la actualidad la reacción de secuenciación se basa en una modificación de la PCR con dideoxinucleótidos (ddNTP) marcados con fluoróforos, y se resuelve mediante una electroforesis capilar. Cada dideoxinucleótido es usado como cebador para la síntesis de ADN, uniéndose a una molécula fluorescente que confiere a todos los fragmentos terminados en ese nucleótido un color determinado. Los cuatro ddNTP se añaden a un único tubo donde los fragmentos coloreados resultantes se separan a continuación por tamaño mediante un gel de electroforesis contenido en el tubo capilar. Todos los fragmentos de una longitud determinada migran a través del gel

en un solo pico y el color asociado a cada uno de ellos se detecta utilizando un rayo láser. La secuencia de ADN se lee a partir de los colores de los picos a medida que van pasando por el detector y la información obtenida en los secuenciadores automáticos se guarda en ficheros binarios en un ordenador que determina la secuencia. Las imágenes resultantes reciben el nombre de cromatogramas (*Figura 1*).

Las bases de datos genómicos crecen rápidamente, a medida que los logros de la secuenciación van siendo superados por los que llegan a continuación (Nelson & Cox, 2008).

El genoma humano está formado por unos 21.000 genes, localizados en 24 cromosomas del núcleo (22 autosomas y los cromosomas X e Y), además del ADN mitocondrial. Se estima que solo el 1,5 % del total del genoma humano tiene información necesaria para la síntesis de las cadenas peptídicas (proteínas), mientras que el resto codifica distintos ARN o corresponde a secuencias repetitivas cuya función se desconoce (Herráez & Sánchez, 2012). El proyecto genoma humano es un proyecto de investigación muy ambicioso que está permitiendo identificar, y en un futuro, vencer numerosas enfermedades de origen genético. Aunque hay que tener en cuenta que en muchos casos, un determinado gen solo indicará que existe predisposición a padecer cierta enfermedad, dependiendo su desarrollo de factores ambientales o el modo de vida de la persona.

La comparación de la composición de nucleótidos en el gen de una especie con el orden de los nucleótidos de otro gen puede demostrar ciertas variaciones entre organismos de la misma especie, y por tanto detectar posibles enfermedades genéticas. Este proyecto tiene un alto impacto a nivel ético, legal y social. Entre ellas cabe señalar la identificación genética de individuos como el caso de los estudios de paternidad, la identificación criminalística o el acceso a la información de las características genéticas de las personas por parte de las aseguradoras de salud o la policía. Es necesario que todos los ciudadanos conozcan qué consecuencias implica analizar una muestra de ADN, y para ello deben obtener toda la información requerida previamente.

SECUENCIACIÓN DEL ADN

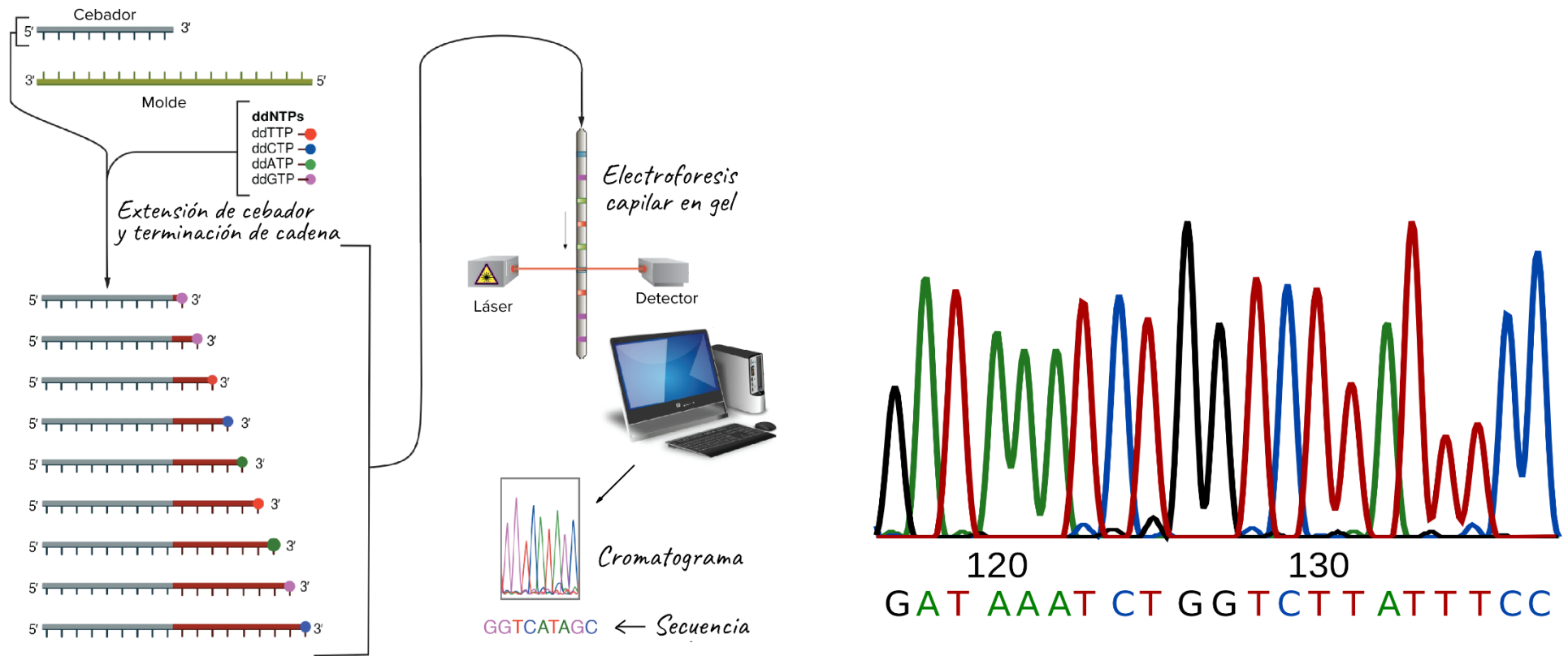


Figura 1. Técnica de secuenciación del genoma (Khan Academy, 2018).

Clonación

Las técnicas para la clonación del ADN han hecho posibles la genómica y la proteómica modernas, el estudio de los genes y las proteínas a nivel celular y a nivel de organismos enteros. Estos nuevos métodos están transformando la investigación básica, la agricultura, la medicina, la ecología y otros campos, además de plantear a la sociedad diversidad de dilemas éticos.

Un clon es una copia idéntica. Este término originalmente se aplicó al aislamiento y reproducción de una célula para crear una población de células idénticas. Para modificar o transferir un gen de un organismo donante a un organismo receptor diferente, el primer paso es obtener un número suficiente de copias de ese gen. Una forma de conseguirlos es mediante la clonación del ADN. La clonación de un gen consiste en introducirlo en una célula de manera que pueda ser copiado y mantenido. Para ello, el gen se inserta en una molécula de ADN, llamada vector de clonación, capaz de entrar y de replicarse de forma independiente en una célula hospedadora. Este proceso comprende cinco procedimientos generales (Nelson & Cox, 2008):

1. Cortar el ADN en lugares determinados (mediante enzimas denominadas endonucleasas de restricción).
2. Selección de una pequeña molécula de ADN capaz de autorreplicarse, también denominados, vectores de clonación, que normalmente se trata de plásmidos o de ADN víricos.
3. Unión covalente de dos fragmentos de ADN mediante la enzima ADN ligasa que une el vector de clonación con el ADN que se desea clonar, formando lo que se denomina ADN recombinante.
4. Traslado del ADN desde el tubo de ensayo a una célula huésped, para llevar a cabo la replicación del ADN.
5. Selección o identificación de las células huésped que contienen ADN recombinante.

Los métodos utilizados para llevar a cabo estos procesos, se denominan colectivamente tecnología del ADN recombinante, dentro de la parte de la ingeniería genética. A esto hay que añadir otros tipos de clonación, como la reproductiva o la terapéutica (*Figura 2*).

Se denomina también clonación a la extracción del núcleo de una célula somática con los genes a clonar de un ser vivo maduro, e introduciéndolo en un ovulo enucleado, es decir, sin su núcleo. Al inducir su desarrollo, se obtiene un embrión que, de implantarse en un útero

femenino, daría lugar a un ser vivo idéntico al individuo de cuya procedencia era el núcleo de la célula de la cual se ha partido. Este proceso se denomina clonación reproductiva (Herráez & Sánchez, 2012) y como resultado se obtiene un ser igual al clonado, sin que se requiera una relación sexual (Figura 3). Este tipo de clonación ha sido empleado para la realización de diversas investigaciones, sin embargo se ha debatido con mucha frecuencia su uso en el futuro, ya que podría utilizarse para crear organismos que tengan cualidades determinadas.

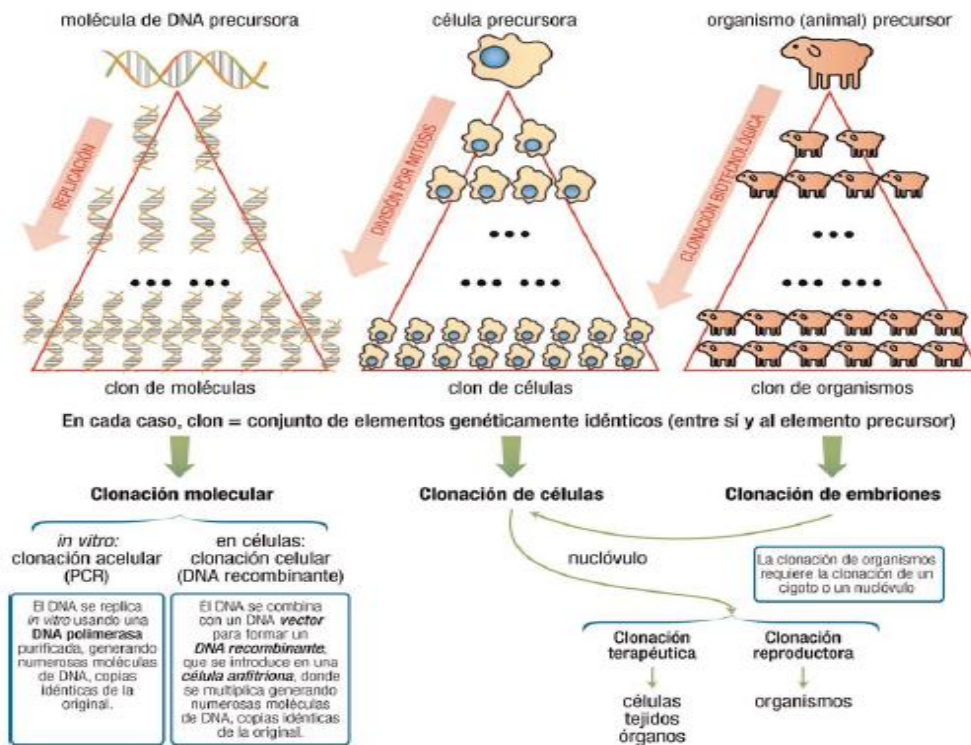


Figura 2. Esquema clonación genética , terapéutica y reproductiva (Herráez & Sánchez, 2012)

La clonación terapéutica está limitada a la fase celular y tiene como principal finalidad la obtención de las denominadas células madre. Las células madre son células capaces de reproducirse indefinidamente y que, estimuladas adecuadamente, pueden evolucionar y diferenciarse hacia cualquier tipo de tejido, ya sea piel, tejido nervioso o muscular (Herráez & Sánchez, 2012). Estos tejidos se podrían utilizar para tratar a pacientes con una gran variedad de enfermedades sin problemas de rechazo. Los diferentes avances en legislación internacional e investigación permiten la clonación de determinados tejidos animales y humanos con fines de investigación médica. Actualmente una aplicación de este método que no tiene ningún tipo de crítica ética al respecto es la clonación de las células de la piel para ser implantadas en pacientes que han sufrido quemaduras o lesiones de piel graves.

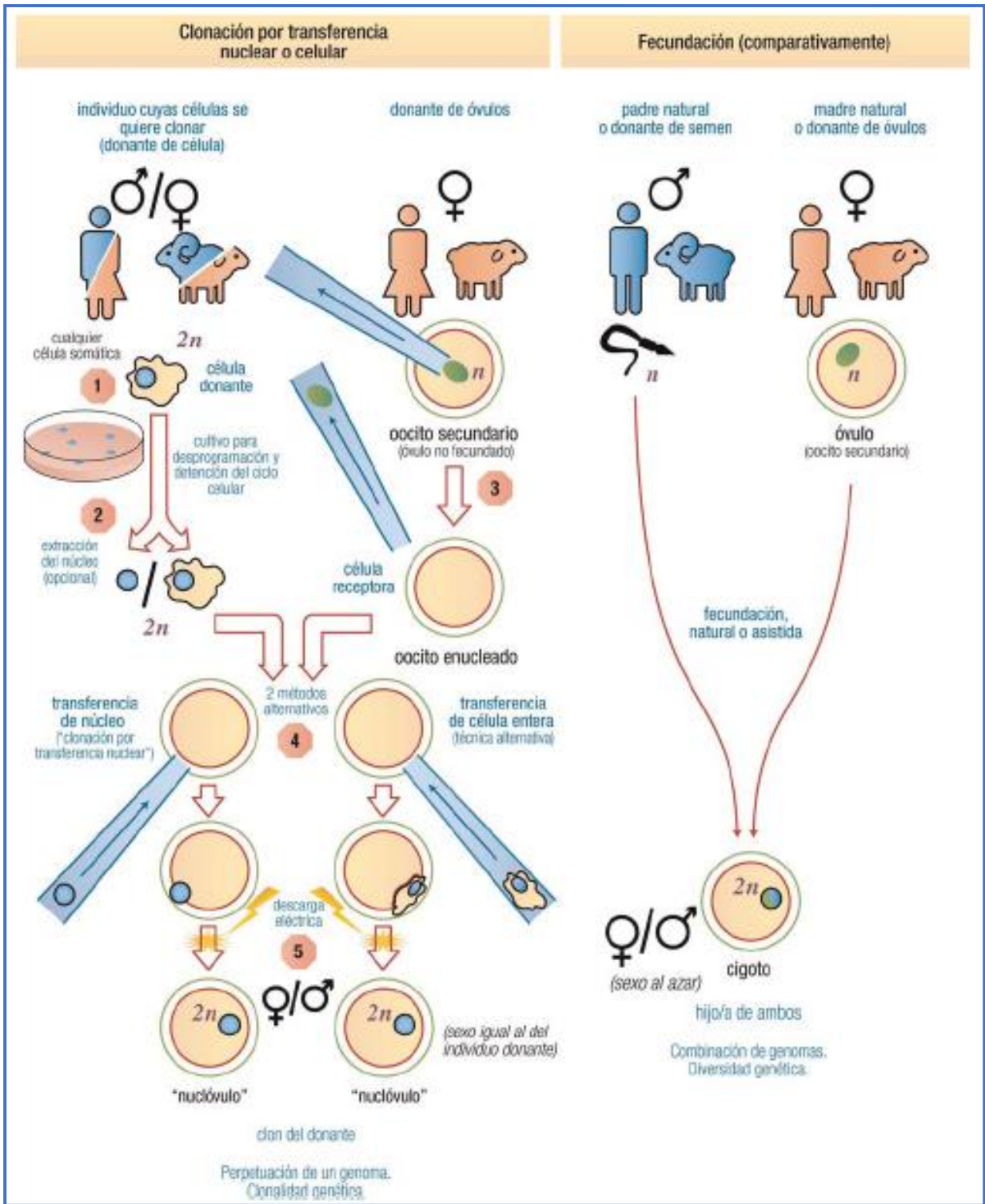


Figura 3. Diferencia entre clonación por transferencia nuclear y el proceso de fecundación (Herráez & Sánchez, 2012)

Edición del genoma

El objetivo de la edición del genoma es modificar la actividad de los genes, es decir, activarlos y desactivarlos. Los últimos avances en las tecnologías para editar la secuencia del genoma están dirigidos al sistema CRISPR, basado en repeticiones palindrómicas cortas de secuencia de bases nitrogenadas, agrupadas y regularmente interespaciadas (Gaj, Gersbach, & Barbas, 2013). Una secuencia de DNA es palindrómica cuando la secuencia de una hebra, leída de izquierda a derecha es igual a la de la otra hebra leída de derecha a izquierda.

Los intentos basados en la técnica CRISPR no fueron eficaces hasta el año 2012, cuando las científicas Emmanuelle Charpentier y Jennifer Doudna de la Universidad de California en Berkeley, demostraron cómo utilizar CRISPR como herramienta de edición programable (Charpentier & Doudna, 2013). El sistema se basa en la utilización de un ARN guía, complementario a la secuencia de ADN que se quiere modificar. Este ARN guía, se une a unas enzimas endonucleasas denominadas Cas9, derivadas principalmente de *Staphylococcus aureus* o *Streptococcus pyogenes*, bacterias comunes que están presentes en muchas personas y pueden, en ocasiones, provocar infecciones patológicas. Dicho sistema corta el ADN que se quiere modificar específicamente, sin alterar otras secuencias, para posteriormente modificarlo (*Figura 4*).

Sin embargo, estas científicas no fueron las descubridoras de CRISPR, fue un investigador español de la Universidad de Alicante, Francisco Mojica, quien descubrió este gran avance en la terapia génica como un mecanismo de defensa empleado por el sistema inmune de bacterias para eliminar virus o plásmidos invasivos, y además como un sistema de almacenamiento de información sobre estos invasores para que las futuras generaciones también puedan adquirir la inmunidad ante estos. Sin embargo, son las científicas Charpentier y Doudna posibles candidatas a el próximo premio Nobel por visionarias, al observar y descubrir la posible aplicación a la modificación del genoma en eucariotas (Charpentier & Doudna, 2013).

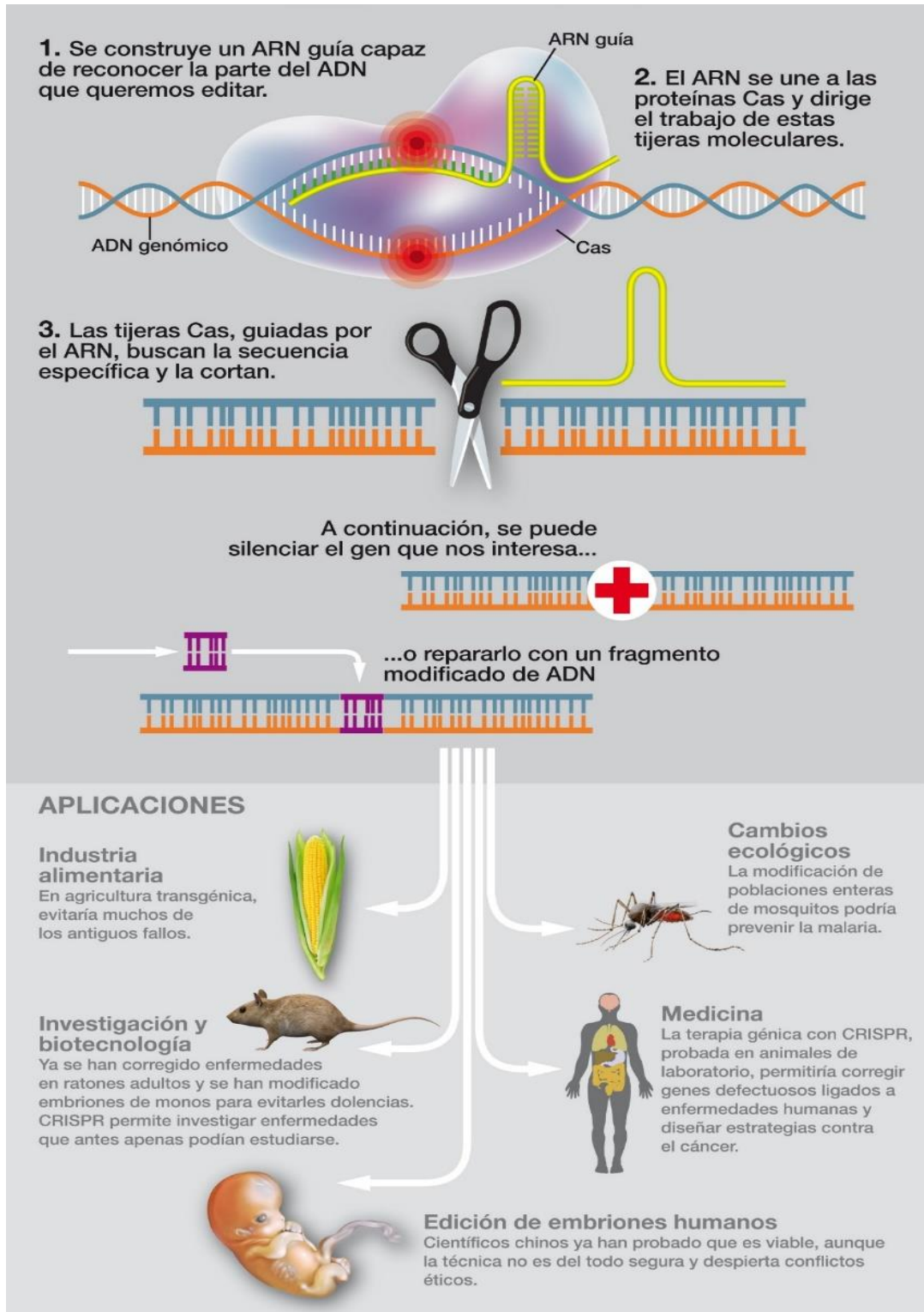


Figura 4. Esquema del sistema CRISPR basado en la Cas9 y sus principales aplicaciones (Cabeza, 2017)

En resumen, CRISPR es una nueva técnica de edición genética, que modifica el genoma de cualquier ser vivo, puede desactivar un gen y evitar que cause un problema que estaba causando, o incluso sustituir la secuencia de un gen defectuoso por la secuencia correcta para tratar o curar una enfermedad. El desarrollo de esta tecnología ha inaugurado una nueva era para la ingeniería genética en la que se puede editar, corregir y alterar el genoma de cualquier célula de una manera fácil, rápida, barata y altamente precisa (Shipman et al., 2017).

Los trabajos de investigación llevados a cabo con esta tecnología pueden agruparse en: aquellos orientados a la modificación de células somáticas, como los que se han llevado a cabo en EEUU y China, en ensayos clínicos para el tratamiento de cáncer en seres humanos, y cambios producidos en los genes de óvulos y espermatozoides, denominadas células germinales o en los genes de un embrión (Wang & Qi, 2018). Ha sido en las últimas investigaciones donde se ha llevado a cabo la modificación de embriones humanos con CRISPR para eliminar una enfermedad hereditaria. Los embriones resultantes son viables y no tienen errores, lo que si había pasado anteriormente con otras tecnologías (Gaj, Gersbach & Barbas, 2013; Wang & Qi, 2018).

La edición del genoma es ahora más que nunca un tema controvertido. La modificación en células somáticas no genera debate, puesto que los cambios introducidos no son heredables. Sin embargo, aquellos generados en las células de la línea germinal o embriones pueden heredarse. Así, no estamos tan lejos de generar bebés con capacidades físicas y mentales superiores, seleccionados a la carta. La utilización de esta herramienta es un debate abierto en la comunidad científica con investigadores manifestando que CRISPR se debería de utilizar como último recurso para tratar a bebés con enfermedades congénitas serias (Gaj et al., 2013).

Objetivos

Haciendo hincapié en la importancia de la alfabetización científica del alumnado para la posibilidad de tomar decisiones en un futuro, y la capacidad de debatir cuestiones éticas sobre ciencia, se necesita un conocimiento básico sobre genética que se adquirirá principalmente durante la Educación Secundaria. Por ello, el objetivo de nuestro trabajo ha sido: valorar si es posible la introducción del conocimiento de nuevos avances científicos en el currículo de la Educación Secundaria y si se desarrolla el sentido crítico respecto a éstos.

Para ello hemos llevado a cabo el análisis valorando tres aspectos:

1. Estudiar la presencia de explicaciones sobre los nuevos avances científicos y cuestiones éticas en el currículo según la ley vigente, LOMCE, y en los libros de texto utilizados en 4º de ESO y 1º y 2º de Bachillerato. El objetivo además de analizar la descripción de las explicaciones, fue detectar errores conceptuales que puedan dar lugar a ideas alternativas, considerando conceptos como:
 - Determinismo genético.
 - Mutaciones.
2. Evaluar las ideas previas que los alumnos tienen sobre genética y su opinión sobre los nuevos avances científicos teniendo en cuenta:
 - La organización del material genético.
 - Expresión de la información genética.
 - Cuestiones éticas sobre los avances científicos.
 - Determinismo genético, caracteres cuantitativos y cualitativos.
 - Concepto de mutación y clonación.
3. Presentar en el aula de 2º de Bachillerato los nuevos avances científicos a través de un aprendizaje basado en la argumentación, para llevar a debate aquellas cuestiones éticas, y evaluar si los alumnos han sido capaces de asimilar los conceptos presentados y han desarrollado un juicio crítico.

Metodología

Análisis del currículo de la Educación Secundaria

La enseñanza de la genética forma parte del currículo actual del Sistema Educativo Español. En la última Ley Orgánica 8/2013, de 9 de Diciembre, para la mejora de la calidad educativa (LOMCE), la Genética se encuentra en el currículo de 4º de la Educación Secundaria Obligatoria (ESO) en la asignatura de Biología y Geología y en 2º de Bachillerato en la asignatura de Biología.

Se realizó el análisis de los contenidos en genética de las dos últimas leyes educativas y sus respectivos Decretos Forales. La Ley Orgánica 2/2003 de Educación, de 3 de Mayo (LOE) y sus Decretos Forales que la desarrollan (DF 25/2007, de 19 de Marzo y DF 29/2008, de 12 de Mayo) y la LOMCE con su Decreto Foral (DF 25/2015, de 22 de Abril).

Analizando la LOE (DF 25/2007; DF 29/2008), los contenidos en genética no aparecen hasta 4º de la ESO, aunque es en 3º de la ESO donde se introducen algunos contenidos relacionados con las enfermedades humanas, y en concreto, las enfermedades genéticas en la asignatura de Biología y Geología. La genética en 4º de la ESO se presenta en el bloque 3, *La evolución de la vida*, en la unidad de herencia y transmisión de los caracteres. En los criterios de evaluación de este bloque se introduce el concepto de ADN y el de diversidad genética, así como las mutaciones. Además, señala la necesidad del desarrollo del sentido crítico hacia los nuevos avances en el conocimiento del genoma.

En esta misma ley, en la asignatura de Ciencias para el Mundo Contemporáneo en 1º de Bachillerato, dentro del bloque 2, *Nuestro lugar en el universo*, se presentan los contenidos tanto de la selección natural darwiniana y su explicación genética, como los cambios genéticos que condicionan la especie humana. En esta misma asignatura, en el bloque 3, *Vivir más, Vivir mejor*, se tratan temas más actuales como las nuevas técnicas de biotecnología, sus principales aplicaciones y limitaciones, con el objetivo de que los alumnos desarrollen su juicio crítico respecto a los nuevos avances de la ciencia.

En 2º de Bachillerato, en la modalidad de Ciencias y Tecnología, se incluye la genética en la asignatura de Biología. Esta aparece en el bloque 3, *Herencia, Genética Molecular*, donde se explica la transcripción y traducción génica en procariotas y eucariotas, y el concepto de mutación génica, sus causas y su influencia en la diversidad y evolución de las especies. En el bloque anterior no hay ningún apartado donde se trate la secuenciación genómica, ni los posibles avances respecto a este tema.

En el análisis de la nueva ley de educación, la LOMCE (DF 24/2015; DF 25/2015), se puede observar como existe una mayor presencia de la genética en el currículo, y además de forma más transversal. Sin embargo, no presenta prácticamente ninguna modificación respecto a la LOE en el tema que estamos analizando; los nuevos avances científicos relacionados con la genética.

La genética está presente en el currículo de 4º de la ESO (*Tabla 1*), concretamente en el bloque 1, *La evolución de la vida* de la asignatura de Biología y Geología, donde se encuentra el contenido sobre la expresión de la información genética, el código genético y sus mutaciones, además de temas actuales como la ingeniería genética y biotecnología, donde se da un análisis de las implicaciones éticas, sociales y medioambientales. En este mismo curso, en la asignatura de Filosofía (asignatura troncal, es decir, común en todos los itinerarios), en el bloque 2, *Identidad personal*, también aparece la herencia genética, desde la perspectiva de la incidencia a lo adquirido y el aprendizaje. A este contenido se le suma el bloque 5, *Transformación* donde aparece el libre albedrío, teniendo en cuenta los avances de la genética.

En el Bachillerato de Ciencias de la Salud (*Tabla 2*), en el currículo de 1º de Bachillerato no aparece el contenido que estamos analizando. En 2º de Bachillerato, en la asignatura de Biología, en el bloque 3, *Genética y evolución*, relacionado con el tema del estudio, aparecen la ingeniería genética y las principales líneas actuales de investigación en este bloque. Además también se trata el Proyecto Genoma Humano, con sus repercusiones sociales y valoraciones éticas de la manipulación genética y de las nuevas terapias génicas.

El currículo de Bachillerato de la LOMCE, aparecen asignaturas específicas, como Cultura Científica de 1º de Bachillerato en la modalidad de Artes, y Psicología de 2º Bachillerato en la modalidad de Artes, Humanidades y Ciencias Sociales, donde aparecen temas relacionados con la genética (*Tabla 3*). En el caso de la asignatura de Cultura Científica, en el bloque 4, *La revolución genética*, se tratan aspectos como el Proyecto del Genoma Humano y la biomedicina e ingeniería genética, valorando de forma crítica los avances en estas áreas. En la asignatura de Psicología se trata la genética en el bloque 2, *Fundamentos biológicos de la conducta humana*, donde aparecen los genes y la conducta, las mutaciones y las alteraciones cromosómicas. En el bloque 5, *La construcción del ser humano*, se aborda el tema del desarrollo de la personalidad influenciada por la genética. En esta última asignatura no se trata el tema de la secuenciación genómica. En ambos itinerarios, la asignatura de Filosofía de 1º de Bachillerato trata el tema del determinismo genético, en el bloque 5, *El ser humano desde la Filosofía*.

Tabla 1. Análisis del currículo de 4º de la ESO de la LOMCE. Modificado con el DF 24/2015 y DF 25/2015

Curso	Itinerario	Asignatura	Bloque	Contenidos	Criterios de Evaluación/ Estándares de aprendizaje
4º ESO	Científico	Biología y Geología	Bloque 1. La evolución de la vida	<ul style="list-style-type: none"> • Célula y ciclo celular. • Los ácidos nucleicos. • ADN y genética molecular. • Replicación del ADN. • Concepto de gen. • Expresión de la información genética. • Código genético y mutaciones. • Leyes de Mendel. • Ingeniería genética, biotecnología y bioética. • Evolución: teorías y proceso de hominización. 	<ul style="list-style-type: none"> • Comparar la estructura de los cromosomas con la cromatina. • Formular los principales procesos de la mitosis y meiosis. • Comparar los tipos de ácidos nucleicos, su composición y función. • Comprender la expresión de la información genética utilizando el código genético. • Formular los principios básicos de la Genética Mendeliana. • Identificar las principales técnicas de ingeniería genética, analizando las implicaciones éticas, sociales y medioambientales. • Comprender los mecanismos de la evolución destacando la importancia de las mutaciones y la selección natural. • Analizar argumentos a favor y en contra de las distintas teorías que existen sobre la evolución.
	Humanístico Científico	Filosofía	Bloque 2. Identidad personal	<ul style="list-style-type: none"> • La Herencia genética y el aprendizaje. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reflexionar sobre la posible incidencia de la herencia genética y de lo adquirido en el desarrollo de la personalidad.
			Bloque 6. Transformación	<ul style="list-style-type: none"> • El libre albedrío. 	<ul style="list-style-type: none"> • Exponer las reflexiones sobre la posibilidad de que exista o no el libre albedrío, teniendo en cuenta los avances en el conocimiento de la genética.

Tabla 2. Análisis del currículo de Bachillerato de la modalidad de Ciencias de la Salud de la LOMCE. Modificado con el DF 24/2015 y DF 25/2015

BACHILLERATO MODALIDAD CIENCIAS DE LA SALUD				
Curso	Asignatura	Bloque	Contenidos	Criterios de Evaluación/ Estándares de aprendizaje
1° de Bachillerato	Biología y Geología	Bloque 1. Los seres vivos: composición y función	<ul style="list-style-type: none"> • Macromoléculas. Estructura y función de los ácidos nucleicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Conocer y describir la estructura general con algunas características de los monómeros que componen los ácidos nucleicos.
2° de Bachillerato	Biología	Bloque 1. La base molecular y fisicoquímica de la vida	<ul style="list-style-type: none"> • Las moléculas orgánicas: glúcidos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar la composición química y describir la función, localización y citar ejemplos de las principales biomoléculas orgánicas.
		Bloque 3. Genética y evolución	<ul style="list-style-type: none"> • ADN como portador de la información genética. • ARN; tipos y funciones. • Relación ADN y síntesis de proteínas. • Procesos de replicación, transcripción y traducción. • Relación entre mutación y cáncer. • Concepto de mutación. • Formulación de los principios de la genética mendeliana. • Evolución y su relación con las mutaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer la relación del ADN con el proceso de la síntesis de proteínas. • Diferenciar los tipos de ARN, así como la función de cada uno de ellos en los procesos de transcripción y traducción. • Reconocer las características fundamentales del código genético aplicando dicho conocimiento a la resolución de problemas de genética molecular. • Interpretar y explicar esquemas de los procesos de replicación, transcripción y traducción. • Ilustrar la relación entre mutación y recombinación, el aumento de la diversidad y su influencia en la evolución de los seres vivos. • Reconocer los descubrimientos más recientes sobre el genoma humano y sus aplicaciones en ingeniería genética

			<ul style="list-style-type: none"> • Relación de genotipo y frecuencias génicas con genética de poblaciones y su influencia en la evolución. • Mutación y recombinación. • Factores que incrementan la biodiversidad. 	valorando sus implicaciones éticas y sociales.
--	--	--	--	--

Tabla 3. Análisis del currículo de Bachillerato de la modalidad de Artes, Humanidades y Ciencias Sociales de la LOMCE. Modificado con el DF 24/2015 y DF 25/2015

BACHILLERATO MODALIDAD ARTES, HUMANIDADES Y CIENCIAS SOCIALES				
Curso	Asignatura	Bloque	Contenidos	Criterios de Evaluación/ Estándares de aprendizaje
1° de Bachillerato	Cultura científica	Bloque 4. La revolución genética	<ul style="list-style-type: none"> • Descubrimientos sobre genética. • ADN y código genético, • Nuevo concepto de gen (un gen, una enzima). • Técnicas y aplicaciones de la Ingeniería genética, sus implicaciones éticas, legales, sociales, ecológicas y sanitarias. • Proyecto Genoma Humano. • Nuevos avances científicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reconocer los hechos históricos más relevantes para el estudio de la genética. • Valorar informaciones sobre el ADN, el código genético, la ingeniería genética y sus aplicaciones médicas. • Conocer los proyectos actuales para descifrar el genoma humano. • Evaluar las aplicaciones de la ingeniería genética en la obtención de fármacos, transgénicos y terapias génicas. • Valorar las repercusiones sociales de la reproducción asistida, la selección y conservación de embriones. • Describir y analizar los posibles usos de la clonación. • Establecer y reconocer el método de obtención de los distintos tipos de células madre, así como su capacidad generativa. • Valorar, de forma crítica, los avances científicos relacionados con la genética, sus usos y consecuencias

				<p>médicas y sociales.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Explicar las ventajas e inconvenientes de los alimentos transgénicos, razonando la conveniencia o no de su uso.
	Filosofía (asignatura troncal)	Bloque 5. El ser humano desde la Filosofía	<ul style="list-style-type: none"> • Determinismo genético. 	<ul style="list-style-type: none"> • Identifica y expone en qué consiste el componente natural innato del ser humano y su relación con lo culturalmente adquirido que caracterizan a nuestra especie. • Localiza información en internet acerca de las investigaciones actuales sobre la evolución humana.
2° de Bachillerato	Psicología	Bloque 2. Fundamentos biológicos de la conducta	<ul style="list-style-type: none"> • Genes y conducta. • Mutaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Explicar la influencia de los componentes genéticos que intervienen en la conducta. • Relacionar la importancia de las alteraciones genéticas con las anomalías en la conducta (usando el vocabulario técnico: mutación, trisomía, delección, etc.)
		Bloque 5. La construcción del ser humano. Motivación, personalidad y afectividad	<ul style="list-style-type: none"> • Naturaleza de la personalidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Comprender en qué consiste la personalidad, relacionada con las influencias genéticas, medioambientales y culturales.

En general, respecto al análisis del currículo de la LOMCE y sus decretos, se podría decir que el tratamiento de los aspectos que estamos considerando es escaso, debido a que aparece exclusivamente en la asignatura de Cultura Científica de 1º de Bachillerato, que no se imparte en todos los centros y tampoco todos los alumnos la cursan. Sin embargo, estos aspectos sí que aparecían en la asignatura troncal de Ciencias del Mundo Contemporánea de la LOE.

A esto hay que añadir que la introducción de la genética en 4º de ESO, es muy tardía, puesto que muchos de los alumnos escogen otro tipo de itinerarios, y nunca llegan a dar este contenido. En 4º de ESO, tampoco alcanzan una alfabetización científica como para ser capaces de decidir en un futuro cuestiones éticas basadas en la genética, ya que no se llega a dar con profundidad estos contenidos, por lo que los alumnos no son capaces de comprender estos aspectos del día a día y mucho menos, ser capaces de argumentar y justificar sus opiniones respecto a ello.

Análisis de los libros de texto de la Educación Secundaria

Con el objetivo de comprobar si los nuevos avances científicos aparecen en los libros de textos de la Educación Secundaria, se han analizado tres libros de 2° de Bachillerato, y otros tres de 4° de la ESO, que como hemos visto en el apartado anterior del currículo de la ley vigente (LOMCE), son en los dos cursos donde aparece el tema a analizar. Todos los libros analizados son posteriores a esta ley, por lo tanto a partir de 2015.

Muchas de las ideas previas y alternativas que tienen los alumnos al llegar a 4° de ESO, se debe fundamentalmente a los libros de texto (Caballero, 2008). Centrándonos en aquellas que pueden resultar más importantes para el aprendizaje de los nuevos avances científicos, nos hemos centrado en observar el tratamiento de las mutaciones y la influencia del ambiente en el genotipo. En la mayoría de los casos no se aborda de manera explícita el determinismo genético, aspecto que debería ser considerado en estos materiales de apoyo básico para el profesorado. Además, en su estudio sólo un libro de texto dedica un apartado para explicar la influencia del ambiente en la expresión de los genes.

Tabla 4. Libros de texto analizados

4° de ESO			2° de Bachillerato		
Editorial	ISBN	Año	Editorial	ISBN	Año
Bruño	978-84-696-1250-7	2017	Bruño	978-84-696-1165-4	2016
Oxford	978-01-905-0263-8	2016	Oxford	978-01-905-0268-3	2016
SM	978-84-675-8639-8	2017	Santillana	978-84-141-0193-3	2016

Los tres libros de Bachillerato (*Tabla 4 y 5*) presentan algún aspecto sobre los nuevos avances científicos, sin embargo avances como los de la edición genómica no aparecen en ninguno de los tres libros de la ESO analizados. Los libros que detallan de una manera más extensa los contenidos sobre genética son los libros de la editorial de Oxford y en segundo lugar los de Bruño. En las cuatro editoriales analizadas presentan “El Proyecto del Genoma Humano”, donde describen con bastante detalle la estructura y la organización del genoma nuclear humano, así como la gran importancia del proyecto. Sin embargo, únicamente es el libro de Bruño de 2° de bachillerato el que dedica un apartado para la descripción del genoma de otras especies, tanto de procariotas y eucariotas, como el genoma vírico.

En el caso del libro de 2° de Bachillerato de Oxford, además de desarrollar el proyecto, aparecen referenciadas webs dedicadas a la genómica como [Instituto Nacional de Investigación del Genoma Humano](#), o incluso imágenes de datos representados en el Centro Nacional de Información Biotecnológica (NCBI) con bastante detalle, similares a las que nos podríamos encontrar en libros de texto de nivel superior o universitario.

El libro analizado de la editorial de Oxford de 2° de Bachillerato es el único libro donde se describe en qué consiste la terapia génica detalladamente, y en concreto tratan la tecnología de CRISPR. Esta es definida como sistema de defensa que tienen las bacterias, que detecta la presencia mediante la proteína Cas9, que corta el ADN y de esta manera lo inactiva. Este sistema se puede introducir en cualquier organismo, incluido el ser humano, y es capaz de producir un corte en el ADN de dicho organismo en un lugar preciso a través de unas enzimas nucleasas. De esta manera, es posible inactivar un gen concreto (por ejemplo, un oncogen causante de un tumor), o bien editar un gen defectuoso, que consiste en eliminar la secuencia portadora de la mutación y sustituirla por un nuevo fragmento de ADN con la secuencia correcta (Oxford, 2016). Además, en el último apartado dedica unas palabras sobre las cuestiones éticas y pone de ejemplo el diseño de niños seleccionados con caracteres a la carta.

Ninguno de los libros define de manera completa el concepto de mutaciones. La editorial Bruño entiende mutación como alteración o cambio que se produce en el material genético. Esta definición puede dar lugar a ideas alternativas, ya que es muy abstracta y nada concisa, pudiendo favorecer a la idea que tienen los alumnos de que el término mutación siempre está relacionada con un cambio en el aspecto físico. Por este motivo, creemos que la definición más acertada es: cualquier modificación introducida en una secuencia nucleotídica que es estable, es decir, permanece tras la replicación del DNA (Fernández, 2010), definición que no aparece en ninguno de los libros analizados.

En ninguno de los libros de texto de 4° de la ESO aparece el desarrollo del proceso de clonación del ADN, ni ninguno de sus procesos relacionados. Únicamente aparece la explicación del proceso de la clonación de la oveja Dolly. Ni siquiera se presenta la posibilidad de los problemas éticos relacionados con este proceso.

Tanto la editorial de Bruño como la de Oxford, desarrollan el capítulo de la ingeniería genética, ambos profundizan en la genómica y la proteómica, aunque es en esta última editorial donde desarrollan en un apartado aspectos éticos, sociales y culturales sobre estas técnicas y nuevos avances. En el caso de la editorial de Bruño, únicamente se pone de manifiesto la problemática ética sobre la huella digital y sus implicaciones.

Tabla 5. Libros de texto de 2° de Bachillerato analizados, clasificados según la editorial y los ítems a estudiar

Libros de texto Editorial 2° de Bachillerato	ITEMS						
	Fenotipo =Genotipo+ Ambiente	Evolución	Proyecto Genoma Humano	Secuenciación genómica	Edición genómica	Clonación	Cuestiones éticas sobre avances científicos
Bruño	Sí (con algunos ejemplos)	Sí, relacionado con mutaciones, teorías, etc.	Sí, sin detalle	Sí, muy breve	Sí, simplemente nombra el mecanismo	Sí, de manera desarrollada	Sí, únicamente invita a argumentar la opinión sobre la huella genética
Oxford	Sí (más desarrollado)	Sí, más desarrollado, sin teorías.	Sí, con detalle, añade ejemplos de datos de bases como el NCBI con ayuda de una imagen	Sí	Sí, ejemplo desarrollado de la tecnología CRISPR/Cas9	Sí, únicamente clonación del ADN	Sí, un apartado para la bioética con muchos aspectos desarrollados
Santillana	Sí, sin ningún ejemplo	Sí, solo mutaciones	No	Sí, sin detalle	No	Sí, sin detalle, a penas ejemplos	Sí, sin detalle, algunas implicaciones sobre la ingeniería genética

En resumen podemos decir, que si bien los nuevos avances científicos no aparecen en muchos libros de texto, son frecuentes las referencias al desarrollo de la ingeniería genética y la biotecnología, pero su presentación es de forma muy breve y poco desarrollada en 4° de ESO, y en varios libros de 2° de Bachillerato. En ninguno de los libros analizados, aparecen actividades que incidan a construir argumentos o desarrollar el juicio crítico sobre estas cuestiones.

En la totalidad de los libros analizados aparece mencionado el Proyecto del Genoma Humano y su importancia, sin embargo, solo unos pocos lo desarrollan y argumentan su gran importancia y avance que se ha producido gracias a este hecho. En el caso de los aspectos que estamos analizando como la introducción de los nuevos avances científicos, solo en un ejemplar de Oxford citan la tecnología de CRISPR como herramienta innovadora para la terapia génica. Además, en todas las editoriales el tema de clonación se presenta a través del ejemplo de la Oveja Dolly, cuando en los últimos años se han producido otros casos de animales clonados. Por lo que se puede concluir que los libros de texto no están actualizados a los nuevos avances científicos en el campo de la genética.

Propuesta didáctica

Si retomamos el objetivo inicial, alcanzar una alfabetización científica del alumnado que le capacite para tomar decisiones en un futuro, y ser capaz de debatir cuestiones éticas sobre ciencia, se necesita de un conocimiento básico sobre genética. Para alcanzar este objetivo es necesario una serie de conocimientos sobre contenidos conceptuales, procedimentales y actitudinales. Por este motivo, el esquema seguido es el siguiente (Figura 5).

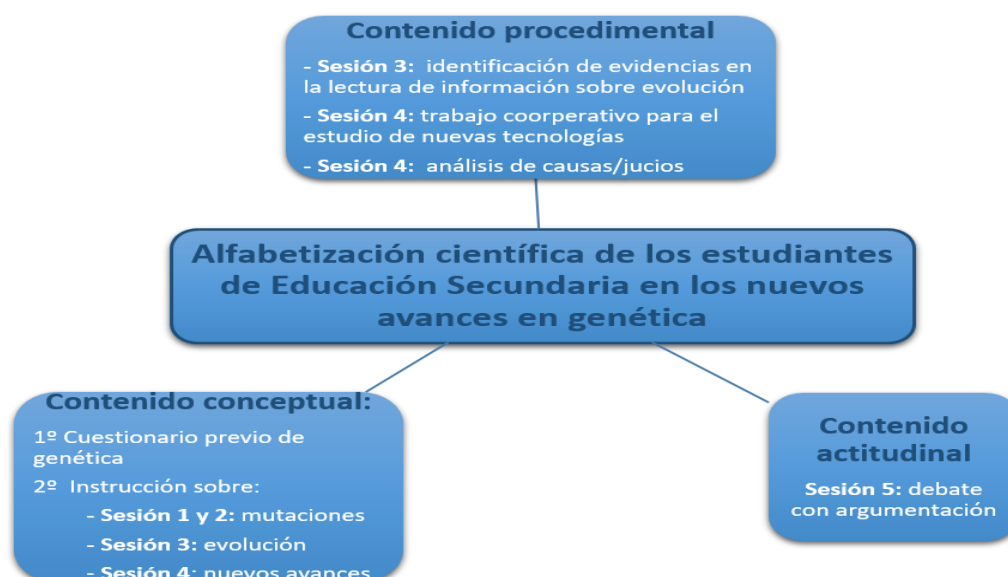


Figura 5. Esquema del planteamiento seguido para la propuesta didáctica

Está claro que el aprendizaje debe ser algo progresivo, por lo que la introducción de nuevos contenidos sin un conocimiento correcto de los anteriores no favorece un aprendizaje significativo. Por esta razón, es imprescindible que todos los alumnos sepan conceptos e ideas básicas para poder comprender los nuevos avances en genética (*Figura 6*). Para llevar a cabo esa comprensión de las técnicas de clonación, secuenciación y edición del genoma consideramos que los alumnos deben primero conocer la organización del material genético, su expresión y posteriormente la influencia del ambiente en el genotipo. Por esa razón, se diseñó primero un cuestionario que nos permitió conocer los conocimientos previos de los alumnos sobre todas estas cuestiones.



Figura 6. Pirámide de conocimientos de genética necesarios para comprender las técnicas de clonación, secuenciación y edición del genoma

Diseño del cuestionario previo sobre genética

Participantes

La investigación se llevó a cabo con un total de 83 alumnos, 18 de 2° de Bachillerato del itinerario de Ciencias de la Salud y 65 de 1° de Bachillerato de diferentes itinerarios en un centro de la comarca de Pamplona, en la Comunidad Foral de Navarra. Durante el curso 2017-2018, la enseñanza de estos dos cursos debe de impartirse acorde a lo estipulado en la LOMCE.

Según el currículo oficial (DF25/2015), los contenidos relacionados con la genética se distribuyen entre las asignaturas de 4° de ESO y 2° de Bachillerato. Como vimos en la introducción, en los currículos oficiales y en la mayoría de los libros de texto, no existe una referencia explícita a los nuevos avances científicos siendo muy escaso el desarrollo del sentido crítico y capacidad de argumentación.

Metodología

Para conocer los conocimientos previos de los alumnos se diseñó un test que constaba de 6 preguntas, entre las cuales se presentaron una serie de ítems abiertos, de escala lineal, de opción múltiple y de desarrollo para la argumentación. Este test se diseñó teniendo en cuenta otros trabajos sobre investigación en el campo de las Ciencias (Márquez, Roca & Sanmartí, 2009; Larrañeta, 2017). Los alumnos dispusieron de entre 15-20 minutos al inicio de la clase para responder el cuestionario, y lo hicieron de forma anónima indicando únicamente el curso, itinerario y el código que se le había asignado a cada uno de ellos (*Anexo 1*).

En la primera parte del cuestionario se pretendía analizar el conocimiento general que tenían los alumnos sobre los nuevos avances científicos (clonación, secuenciación y edición del genoma), mediante preguntas diseñadas en base a una escala de *Likert* de 4 puntos con aspectos sobre peligrosidad, necesidad y factibilidad. Por otra parte, se pidió a los alumnos justificar y argumentar sus opiniones respecto a estas tres cuestiones.

La segunda pregunta del cuestionario tenía como objetivo analizar el conocimiento general sobre la genética celular. Los alumnos tenían que indicar qué células animales como las sanguíneas o gametos como el óvulo, somáticas (hueso y músculo), vegetales (pétalos de una flor) y estructuras no celulares (prótesis de cadera) contienen, respectivamente, información hereditaria, cromosoma/as, cromosomas sexuales, genes y ADN. También se añadieron los virus y las bacterias para indagar las ideas previas que tienen los alumnos sobre estos seres, que a menudo presentan grandes dificultades porque no los pueden observar a simple vista, y juegan un papel importante en los nuevos avances científicos como el caso de CRISPR (Iñiguez & Puigcerver, 2013).

La tercera y cuarta pregunta eran de opción múltiple, se diseñaron con el fin de comprobar qué grado de conocimiento técnico tenían los alumnos sobre las técnicas de clonación y modificación genética. Además, en relación a estas cuestiones, la última pregunta de verdadero y falso, también pretendía indagar qué grado de conocimiento tenían los alumnos sobre los nuevos avances científicos (terapia génica, tecnología del ADN, etc.) así como analizar la existencia de ideas alternativas sobre el concepto de mutación y clonación (Márquez et al., 2009).

En último lugar, la quinta pregunta se basaba en la influencia de caracteres cuantitativos y cualitativos, y tenía como objetivo investigar el conocimiento general de los alumnos sobre la influencia de los factores genéticos y ambientales respecto a características humanas como el grupo sanguíneo, la estatura, las cicatrices, los lunares, el acento al hablar y las enfermedades cardiovasculares.

Para llevar a cabo el análisis sobre las explicaciones de la pregunta 1, se extrajeron conceptos y/o argumentos comunes en las justificaciones de los alumnos (*Tabla 9*).

Todos los análisis estadísticos para la comparación de los resultados entre los cuatro grupos (1° y 2° de Bachillerato Científico, 1° de Bachillerato Científico y Humanístico, y los resultados iniciales y finales de 2° de Bachillerato) se hicieron con el programa *SPSS (SPSS Windows Versión 16.0. Chicago, SPSS Inc.)*. Por un lado, para el análisis de la pregunta 1, se han tratado los datos como escalas ordinales (escala Likert). El resto de preguntas se han analizado considerando como variable la frecuencia de cada respuesta. Además, se han tratado los resultados de 2° de Bachillerato, como muestras pareadas. En todos los análisis las diferencias fueron consideradas significativas cuando el error era $<0,05$.

Resultados y discusión

Los resultados del test de ideas previas sobre genética fueron comparados entre los siguientes grupos:

- Grupo de 1° de Bachillerato del itinerario Científico (33 alumnos).
- Grupo de 1° de Bachillerato del itinerario Humanístico, es decir, no científico (32 alumnos).
- Grupo de 2° de Bachillerato del itinerario de Ciencias de la Salud (18 alumnos).

De los 65 alumnos de 1° de Bachillerato, 29 son del itinerario científico, sin embargo 4 alumnos del itinerario Humanístico fueron agrupados en este grupo, debido a que cursaron la asignatura de Biología y Geología en 4° de ESO, curso en el que se inician los conocimientos de genética y que no vuelven a aparecer hasta 2° de Bachillerato.

Las respuestas de la pregunta 1 se compararon con un *Kruskal-Wallis* con su posterior test. A lo largo de todo el análisis los alumnos del grupo del itinerario científico serán referenciados como 1°C para el de 1° de Bachillerato y 2°C para el grupo de 2°. En cambio, para el grupo de 1° de Bachillerato del itinerario Humanístico se le ha asociado las siglas de 1°H.

Analizando los resultados en la pregunta 1 sobre clonación (*Tabla 6*), podemos observar que existen diferencias altamente significativas entre los tres grupos en lo referido a la peligrosidad, necesidad y factibilidad de la técnica. Llama la atención como los grupos de 1° de Bachillerato consideran la clonación como nada y poco peligrosa, pero en cambio, atendiendo a las cuestiones sobre necesidad y factibilidad, los resultados son más similares entre el grupo del itinerario Humanístico y el grupo de 2° de Bachillerato, los cuales adjudican a la clonación de poca necesidad y factibilidad. Si comparamos los resultados entre los grupos, existen diferencias significativas entre los 2 grupos de 1° y entre el grupo del itinerario no Científico con el de 2° de Bachillerato.

Tabla 6. Mayoría de alumnos de cada uno de los grupos que asocia clonación como una técnica peligrosa, necesaria y factible

Clonación	1°H	1°C	2°C	P
Peligroso	Nada	Poco	Bastante	0,017
Necesaria	Poco	Muy	Poco	<0,001
Factible	Poco	Bastante	Poco	<0,001

Se marca en rojo aquellas respuestas que han llamado la atención, y en azul aquel valor que determina diferencias significativas.

Los resultados atendiendo a la secuenciación del genoma no presentan diferencias significativas entre los tres grupos a excepción de la necesidad de la técnica (Tabla 7). En el caso de la comparación de los grupos de 1° de Bachillerato, sólo se encuentran diferencias significativas en la necesidad de esta técnica, donde un 36,4 % de los alumnos de 1° de Bachillerato del itinerario Científico creen que es muy necesaria, sin embargo, sólo un 12,1 % de los alumnos del otro itinerario señaló esta opción. Si analizamos la comparación entre los grupos del itinerario Científico, no se observan diferencias significativas, ya que las respuestas de ambos grupos son bastante homogéneas.

Llama la atención como únicamente el grupo de 2° de Bachillerato considera bastante peligrosa la secuenciación del genoma y sin embargo, el grupo del itinerario no científico considera poco factible esta técnica a pesar de las numerosas ocasiones que se citan en los medios de comunicación en el campo de la criminalística.

Tabla 7. Mayoría de alumnos de cada uno de los grupos que asocia la secuenciación genómica como una técnica peligrosa, necesaria y factible

Secuenciación del genoma	1°H	1°C	2°C	P
Peligroso	Poco	Poco	Bastante	0,057
Necesaria	Poco	Muy	Muy	<0,001
Factible	Poco	Bastante	Muy	0,776

Se marca en rojo aquellas respuestas que han llamado la atención, y en azul aquel valor que determina diferencias significativas.

Atendiendo a los resultados de la edición del genoma, encontramos diferencias significativas en la comparación de los tres grupos en las cuestiones sobre peligrosidad y factibilidad (Tabla 8). Si llevamos a cabo una comparación entre los grupos de 1° de Bachillerato, no hay diferencias significativas. En cambio, si hacemos la comparación entre los grupos del itinerario Científico, se observa diferencias significativas atendiendo a la cuestión de ser factible.

Tabla 8. Mayoría de alumnos de cada uno de los grupos que asocia edición del genoma como una técnica peligrosa, necesaria y factible

Edición del genoma	1°H	1°C	2°C	P
Peligroso	Nada	Poco	Muy	0,018
Necesaria	Nada	Bastante	Bastante	0,164
Factible	Bastante/Muy	Muy	Bastante	0,018

Se marca en rojo aquellas respuestas que han llamado la atención, y en azul aquel valor que determina diferencias significativas.

Además, en el caso de la peligrosidad, hay una pequeña diferencia de opinión, donde una mayoría de los alumnos de 1° optaron por la opción de poco, y sin embargo, el 44 % de los alumnos de 2° optaron por un muy peligroso.

Únicamente el grupo de 2° de Bachillerato considera la edición del genoma como una técnica muy peligrosa, y sin embargo, el grupo del itinerario no Científico considera la edición como algo nada peligroso y necesario, pero muy factible.

Podemos concluir que la opinión varía según el grado de conocimiento que tengan, y también puede variar según la formación que hayan adquirido, es decir, si en 4° no tuvieron la asignatura de Biología y Geología, si la tuvieron, o si además de esta, cursaron Biología y Geología en 1° de Bachillerato.

Para el análisis de las justificaciones en la parte de desarrollo de la pregunta 1, se ha establecido un criterio común (*Tabla 9*). En él, llama la atención el alto porcentaje de alumnos del grupo del itinerario no Científico que no ha sido capaz de dar ningún argumento sobre las nuevas técnicas: en el caso de clonación y edición del genoma, un 71,9 y 75,0 % respectivamente, y en el caso de la secuenciación del genoma el porcentaje asciende a un 90,6 %. Consideramos que los alumnos que han elegido otros itinerarios no tienen la información adecuada para establecer un juicio crítico sobre las nuevas tecnologías.

Estos resultados se justifican con los resultados obtenidos en estudios sobre la didáctica de las ciencias (Castañeda, 2013) donde los alumnos presentan grandes dificultades para comprender cuestiones sobre genética y más aún a la hora de justificar sus argumentos (Jiménez & Díaz de Bustamante, 2003). Se puede concluir que sin unos conocimientos previos de genética, los alumnos son incapaces de establecer un juicio crítico, y por lo tanto de comprender las nuevas técnicas científicas, claro ejemplo son los resultados obtenidos del grupo del itinerario no Científico.

Por tanto, los resultados obtenidos van acorde con las conclusiones de recientes investigaciones sobre adelantar los contenidos de genética a cursos anteriores a 4° de ESO (Márquez et al., 2009), donde recalcan el hecho de que los alumnos no tienen nociones básicas sobre cuestiones éticas, y por tanto, carecen de capacidad de establecer un juicio crítico (Jiménez & Díaz de Bustamante, 2003), a pesar de cursar un nivel superior de la etapa de Educación Secundaria. En nuestra investigación, la gran mayoría de los alumnos del grupo del itinerario no Científico no ha sido capaz de justificar sus actitudes frente a los nuevos avances científicos.

En cuanto a las justificaciones de juicio positivo, los porcentajes son más altos en los grupos del itinerario Científico (*Tabla 9*), especialmente los alumnos de 2° de Bachillerato. En cambio, el porcentaje de respuestas con argumentos negativos es mayor en el grupo no Científico, sobre todo en la técnica de clonación. Llama la atención el error conceptual repetido en varias respuestas de los grupos de 1° de Bachillerato (21,9 y 12,1 %), donde argumentan que la edición del genoma es nada o muy poco factible debido a la dificultad de modificar el ADN en cada célula de un individuo. Idea que justifica la idea alternativa sobre la comprensión del proceso de mitosis celular (Iñiguez & Puigcerver, 2013; Ruiz et al., 2017; Caballero, 2008).

Tabla 9. Porcentaje de alumnos de cada uno de los tres grupos que justifica sus respuestas atendiendo a los criterios comunes establecidos

Pregunta 1		1°H	1°C	2°C
Clonación	Especies peligro de extinción	6,3	81,8	55,6
	Obtención Células madre	0,0	15,2	66,7
	Alto precio	68,8	30,3	22,2
	Poca supervivencia	56,3	36,4	50,0
	Descendencia con malformaciones	46,9	9,1	5,6
	Variabilidad genética en riesgo	0,0	6,1	33,3
	Sin argumento	71,9	12,1	0,0
Secuenciación del genoma	Detección enfermedades	9,4	51,5	66,7
	Detección mutaciones	0,0	9,1	27,8
	Comprensión del funcionamiento del cuerpo	0,0	36,4	16,7
	Nombra el método Sanger	0,0	0,0	5,6
	Ejemplos prácticos	3,1	15,2	44,4
	Sin argumento	90,6	45,5	33,3
Edición del genoma	Diferencias entre secuencias de ADN y su consecuencia	0,0	0,0	16,7
	Corrección mutaciones	0,0	9,1	61,1
	Cura de enfermedades	12,5	63,6	94,4
	Difícil modificar el ADN de cada célula	21,9	12,1	0,0
	Niños a la carta	0,0	0,0	16,7
	Sin argumento	75,0	36,4	5,6

Se marca en negrita la opción más frecuente para cada criterio, donde el color verde representa las justificaciones positivas, en rojo las opiniones negativas y en naranja las respuestas en blanco (sin argumento).

Los resultados de la segunda pregunta sobre la identificación de la presencia de diferentes elementos (información hereditaria, cromosomas, cromosomas sexuales, genes y ADN) en cada tipo celular (célula sanguínea, célula sexual, hueso, músculo, pétalos de una flor) y microorganismos como bacterias y virus (*Tabla 10*), no se han analizado utilizando un test estadístico. Esto es debido a que tanto en este trabajo, como en otros previos se ha detectado que existen bastantes incongruencias en las respuestas de los alumnos en este tipo de ejercicios (Larrañeta, 2017). Por ejemplo, pueden llegar a señalar cromosomas y ADN en un

tipo celular, sin señalar información hereditaria y sin embargo, en otro tipo celular distinto, señalar información hereditaria ADN y no cromosomas. A pesar de ello, creemos que la pregunta permite un buen análisis de los conocimientos más básicos en genética de los alumnos y de ella se pueden concluir aspectos importantes.

La práctica totalidad de los alumnos asocia los cromosomas sexuales únicamente con el óvulo (célula de la línea germinal), pero solo alrededor de un 11 % en 2° de Bachillerato y un 9 % en el grupo de 1° Científico los relaciona con el resto de tipos celulares. Llama la atención que en los tres grupos casi la mitad afirma que los pétalos de una flor no tienen ADN, sin embargo, un alto porcentaje de alumnos sí sitúan el ADN en el hueso (61 % en 2° y alrededor de un 30 % en los grupos de 1°) o en el músculo (78 % en 2° y casi la mitad de los alumnos de los grupos de 1°). La presencia de ADN en cada tipo celular es el porcentaje más alto en los tres grupos, es decir, la mayoría del alumnado asocia el ADN con todos los elementos, a excepción de los virus en el grupo de 1° de Bachillerato no científico.

Curiosamente, los alumnos de 1° de Bachillerato Científico tienen un mayor porcentaje en cuanto a la identificación de información hereditaria en los diferentes tipos celulares, pero en cambio, es el grupo de 2° quien tiene un mayor porcentaje tanto en la identificación de cromosomas y cromosomas sexuales, como de genes y ADN. La mayor diferencia entre los dos grupos de ciencias es la consideración de las bacterias. Además, pocos alumnos (menos del 25 % en el caso de 1° de Bachillerato Científico) consideran que el virus tenga información hereditaria, cromosomas, genes y ADN, siendo este último elemento, el de mayor porcentaje (alrededor de 30 % en el grupo de 2° de Bachillerato y 12 % en 1° de Ciencias).

Es evidente que la prótesis de cadera, como elemento artificial no contiene ninguno de los 5 elementos de la tabla. Sin embargo, en 1° de Bachillerato de la modalidad de letras, algún alumno (3) considera que tiene genes, y 4 opinan que tiene ADN.

Los alumnos consideran prácticamente que el óvulo es portador de los 5 elementos, aunque el porcentaje desciende en los cromosomas hasta un 6 % en el caso de los grupos de 1° de Bachillerato y un 39 % en el grupo de 2°. Gran porcentaje de alumnos cree que al tener cromosomas sexuales, no contiene cromosomas. Curiosamente el siguiente elemento que consideran como portador de los 5 elementos es la célula sanguínea, a lo que le sigue el músculo. Los otros tipos celulares como el hueso o la flor tienen un menor porcentaje. Este último elemento tiene un menor porcentaje en todos los grupos respecto al resto de los elementos, lo que muestra la gran dificultad que tienen los alumnos para identificar la presencia de estos elementos en el mundo vegetal (Ruiz, Banet, & López, 2017).

Llama la atención que únicamente un alumno en 2° de Bachillerato identificó la presencia de los 5 elementos en todos los tipos celulares. Si se descarta la opción del virus y la bacteria, el número asciende mínimamente a 2 en 2° de Bachillerato y a 1 alumno en el grupo de 1° del itinerario científico, datos preocupantes que analizan las dificultades de los alumnos en la comprensión de la organización del material genético (Iñiguez & Puigcerver, 2013).

Los datos obtenidos en esta pregunta concuerdan con los resultados obtenidos en otros trabajos en alumnos de itinerarios científicos (Larrañeta, 2017). Sin embargo, es también preocupante como el porcentaje de aciertos en nuestro caso no varía en función de los itinerarios, estudio que no se llevó a cabo en dichas investigaciones, por tanto necesitaríamos realizar dicha pregunta en varios centros para poder concluir que las respuestas son homogéneas en todos los itinerarios de los cursos superiores de la Educación Secundaria.

Podemos concluir que, a pesar de las mejoras que se han llevado a cabo en la enseñanza de la Genética (Redfield, 2012), observamos que todavía los alumnos siguen teniendo problemas para identificar la localización del ADN y su función, incluso en aquellos alumnos que cursan itinerarios científicos y están próximos a su incorporación a estudios universitarios.

Tabla 10. Porcentaje de alumnos de cada uno de los tres grupos que identifica la presencia de elementos en cada tipo celular

Pregunta 2	Información hereditaria			Cromosoma/s			Cromosomas sexuales			Genes			ADN		
	1°H	1°C	2°C	1°H	1°C	2°C	1°H	1°C	2°C	1°H	1°C	2°C	1°H	1°C	2°C
Sangre	43,8	60,6	27,8	59,4	60,6	61,1	0,0	6,1	11,1	37,5	36,4	44,4	46,9	78,8	83,3
Óvulo	59,4	97,0	83,3	6,3	6,1	38,9	96,9	100,0	100,0	62,5	81,8	77,8	46,9	87,9	77,8
Músculo	9,4	18,2	16,7	6,3	12,1	61,1	0,0	9,1	11,1	37,5	45,5	50,0	43,8	51,5	77,8
Hueso	12,5	24,2	5,6	12,5	18,2	38,9	0,0	9,1	11,1	43,8	42,4	11,1	31,3	36,4	61,1
Prótesis de cadera	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,4	0,0	0,0	12,5	0,0	0,0
Pétalos de una flor	21,9	21,2	55,6	9,4	18,2	38,9	9,4	9,1	11,1	21,9	21,2	33,3	34,4	45,5	50,0
Bacteria	12,5	39,4	33,3	3,1	3,0	50,0	6,3	6,1	11,1	15,6	15,2	22,2	46,9	66,7	83,3
Virus	0,0	24,2	11,1	3,1	3,0	16,7	3,1	3,0	0,0	3,1	3,0	5,6	9,4	12,1	33,3

La opción más frecuente de cada tipo celular se marca en verde y en rojo, la opción incorrecta.

Los resultados tanto de la pregunta 3 como de la 4, presentan diferencias significativas entre grupos. Analizando los resultados de la pregunta 3 sobre clonación (*Tablas 11 y 12*), podemos observar como en todos los grupos la opción correcta (a) es la que más se repite en los alumnos (56,3, 84,8 y 61,1 %). El mayor porcentaje de acierto es el de 1° de Bachillerato del itinerario Científico (84,8 %), resultados esperados dado que es en 4° de ESO en la asignatura de Biología y Geología donde aparece el contenido sobre clonación, y en concreto, sobre la Oveja Dolly. Si comparamos los dos grupos de 1° de Bachillerato, la diferencia también es significativa ($p=0,011$).

En el caso de la pregunta 4 sobre la expresión de genes (*Tablas 11 y 12*), el porcentaje es mayor en la respuesta correcta en los dos grupos de Ciencias (51,5 y 88,9 %), aunque hay diferencias significativas entre ambos grupos ($p=0,008$). Esto puede explicarse a que habitualmente la presentación de la transcripción de los genes y sus mecanismos de regulación es muy básica en 4° de ESO en comparación con el exhaustivo contenido molecular de este mecanismo que se presenta en 2° (Ruiz et al., 2017). Sin embargo, esta tendencia no se repite en el grupo de 1° de Bachillerato no científico, donde el mayor porcentaje, 46,9 % seleccionó una respuesta no correcta, además de un 15,6 % y un 21,9 % también no correctos, por lo tanto, tal y como suponían los trabajos sobre didáctica de la genética (Iñiguez & Puigserver, 2013), hay diferencias significativas entre los grupos que sí han cursado Biología en 4° de ESO y el grupo de otro itinerario.

Tabla 11. Porcentaje de alumnos de cada uno de los grupos de 1° de Bachillerato en las preguntas 3 y 4

Pregunta 3 y 4 Contingencia (2x2)	1°H				1°C				p
	a	b	c	d	a	b	c	d	
3_clonación Dolly	56,3	31,25	6,25	6,25	84,8	15,2	0,0	0,0	0,011
4-pep Mendaka	15,6	21,9	15,6	46,9	9,1	6,1	51,5	33,3	0,002

La opción correcta se muestra sombreada y en verde, en rojo la opción más frecuente si es incorrecta. La casilla sombreada en azul más oscuro representa las diferencias significativas.

Tabla 12. Porcentaje de alumnos de los dos grupos del itinerario Científico en las preguntas 3 y 4

Pregunta 3 y 4 Contingencia (2x2)	1°C				2° C				p
	a	b	c	d	a	b	c	d	
3_clonación Dolly	84,8	38,9	0,0	0,0	61,1	38,9	0,0	0,0	0,056
4-pep Mendaka	0,0	5,6	51,5	5,6	0,0	5,6	88,9	5,6	0,008

La opción correcta se muestra sombreada y en verde. La casilla sombreada en azul oscuro representa las diferencias significativas.

Tras la comparación de los resultados de la pregunta 5 de los tres grupos (*Figuras 7-9*), se pudieron observar diferencias significativas en algunos de los ítems, en concreto los que incluían caracteres cuya expresión se modula por factores ambientales y genéticos, es decir, la estatura ($p=0,006$), los lunares ($p=0,002$) y la enfermedad cardiovascular ($p=0,001$).

En las dos primeras cuestiones sobre el grupo sanguíneo y la estatura (*Figura 7*) se puede observar como en el primer caso prácticamente una totalidad de los alumnos lo relacionan con factores genéticos (respuesta correcta). Cabe destacar que en comparación con las otras preguntas del test, esta pregunta tiene un alto porcentaje de aciertos por parte del grupo del itinerario no científico. Sin embargo, si atendemos a las respuestas sobre la estatura, se puede observar como los porcentajes más altos también son los de la opción de factores genéticos, sin embargo en este caso, la respuesta correcta sería la de modulación entre ambos factores, opción que ha seleccionado el 44,4 % de los estudiantes de 2º de Bachillerato.

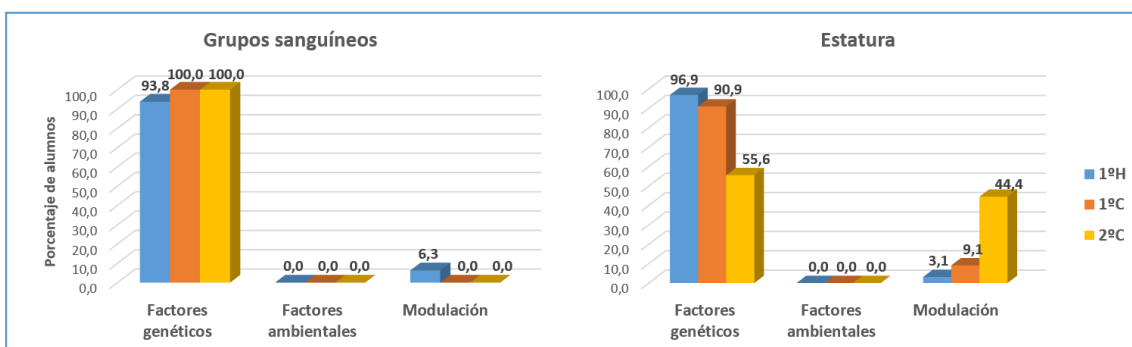


Figura 7. Porcentaje de alumnos para cada curso en dos de las cuestiones de la pregunta 5

El caso de los ejemplos cuyo factor de influencia es el ambiente, es decir, el acento al hablar y las cicatrices (*Figura 8*), solo se observan diferencias significativas en este último entre los dos grupos de 1º de Bachillerato ($p=0,016$). Sin embargo, en ambos casos el mayor porcentaje de alumnos en cada grupo ha respondido correctamente. Llama la atención el alto porcentaje (40,6 %) del grupo no Científico que asocia las cicatrices con una modulación entre ambos factores.

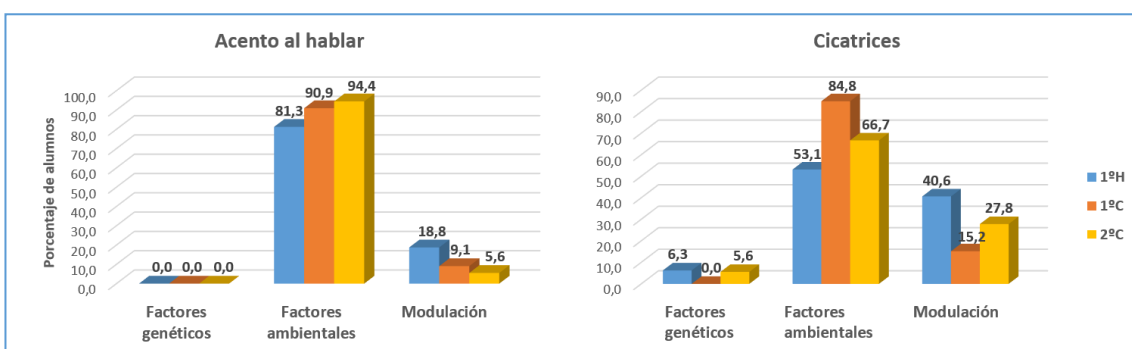


Figura 8. Porcentaje de alumnos para cada curso en dos de las cuestiones de la pregunta 5

En los últimos dos ejemplos, lunares y enfermedad cardiovascular (*Figura 9*), caracteres modulados tanto por factores genéticos como por el ambiente, se observaron diferencias significativas entre los tres grupos. En estos dos ejemplos, también el mayor porcentaje de cada grupo es el de la opción correcta, a excepción el grupo de 1º de

Bachillerato no Científico en el caso de los lunares que les asigna una influencia predominantemente por el ambiente.

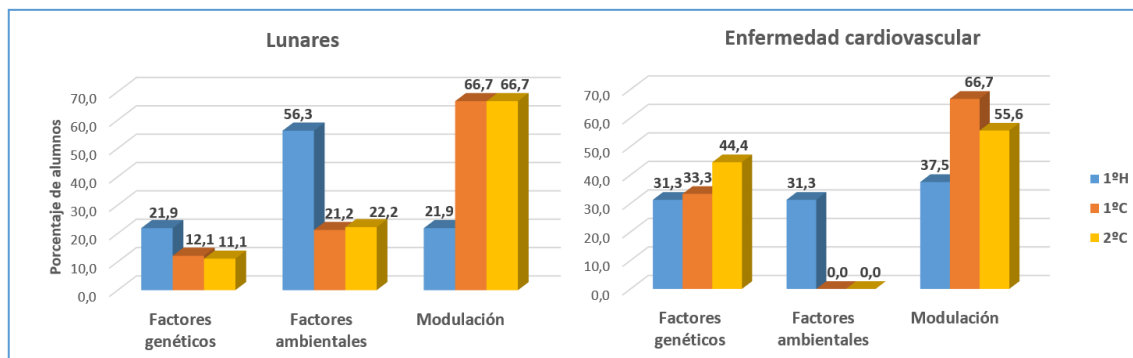


Figura 9. Porcentaje de alumnos para cada curso en dos de las cuestiones de la pregunta 5

Si observamos las gráficas, podemos observar como el porcentaje de opciones incorrectas es mayor en todos los grupos cuando se trata de opciones modulados por ambos factores, lo que determina la dificultad de comprensión del alumnado de la influencia del ambiente en los caracteres (Iñiguez & Puigcerver, 2013). Esto puede ser debido a malas prácticas en el aula, donde los alumnos no se enfrentan a ejemplos donde existe la posibilidad de que el ambiente modifique el genotipo. Este hecho, puede dificultar la comprensión del concepto predisposición a una enfermedad en un futuro, lo que condiciona la capacidad de establecer un juicio crítico sobre técnicas como secuenciación y edición del genoma.

A pesar del apunte anterior, los resultados de esta pregunta han sido favorables, esto puede ser debido a que en el curso de 1º de Bachillerato, en concreto en la primera evaluación, los alumnos trabajaron el determinismo genético en la asignatura de Filosofía.

Cuando se compara los resultados de los grupos del itinerario Científico, podemos observar como no hay diferencias significativas entre grupos, y que la tendencia es la misma en ambos. Sin embargo, llama la atención que el porcentaje de aciertos en cada opción es mayor siempre en el grupo de 1º de Bachillerato, hecho que puede reforzar el argumento del párrafo anterior.

Analizando los resultados de la pregunta 6 de verdadero y falso (Figura 10) se puede observar diferencias significativas entre grupos en las cuestiones sobre edición genómica y mecanismo CRISPR, así como, los conceptos de mutación y clonación.

En el caso del grupo de 1º del itinerario Científico, el mayor porcentaje en 4 preguntas fue la de la opción correcta. Sin embargo, en el caso del grupo no científico, el mayor porcentaje en 4 preguntas corresponde a las respuestas incorrectas, a esto se le suma que el resto de preguntas, es decir, las otras 3, el mayor porcentaje es el de duda. Cabe destacar, que

en todas las respuestas, el porcentaje de duda, es mayor en el grupo no científico. Si comparamos los resultados en los dos grupos de 1º, se observan diferencias significativas en las mismas cuestiones citadas en el párrafo anterior: mutación ($p=0,022$), edición del genoma ($p < 0,001$), mecanismo CRISPR ($p=0,007$), y clonación ($p=0,003$). Sin embargo, no hay diferencias significativas si comparamos los dos grupos de ciencias, ya que la tendencia en todas las respuestas es la misma.

El mayor porcentaje de aciertos se encuentran en las preguntas sobre clonación y mutación (*Figura 10*), conceptos que les pueden resultar más próximos en su vida cotidiana, y en las preguntas sobre epigenética y expresión de genes, lo que concuerda con recientes investigaciones sobre la didáctica de la genética (Ruiz et al., 2017). En ellos se citan ejemplos de cómo los aspectos más abstractos y alejados de un contexto cotidiano presentan mayor dificultad en los alumnos. En el caso de las preguntas sobre el genoma, tanto de edición como de su variación, los porcentajes más altos corresponden a las respuestas incorrectas. En grupos del itinerario Científico, el porcentaje de duda en todas las respuestas es similar, y en concreto, el mayor porcentaje es en la del mecanismo CRISPR (55,5 y 66,7% respectivamente), lo que permite comprobar el desconocimiento de los alumnos sobre los avances científicos más recientes. Además, tras el análisis de esta pregunta, se puede deducir como la elección de un itinerario diferente del científico repercute en el conocimiento sobre genética de los alumnos.

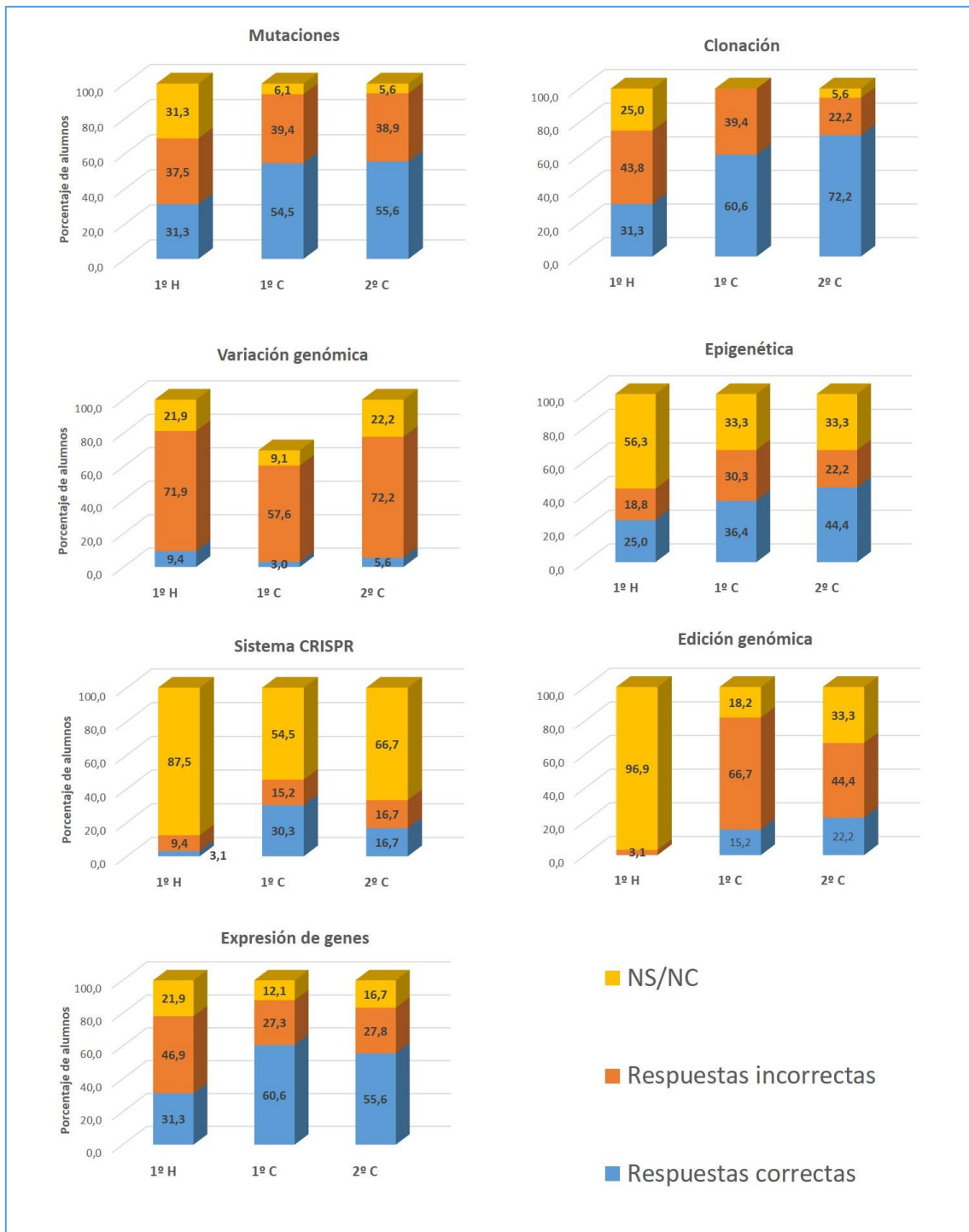


Figura 10. Porcentaje de alumnos de cada uno de los grupos con respuestas correctas, incorrectas o de duda ante los diferentes ítems.

Resumen

Tras el análisis estadístico de las preguntas, podemos resumir los resultados del cuestionario previo de genética en 6 apartados:

1. Curiosamente la mayoría de alumnos de 1º de Bachillerato Humanístico identifican la técnica de clonación como un avance nada peligroso y poco necesario y factible.

Sin embargo, los alumnos de 1° de Bachillerato Científico, cambian su actitud ante la necesidad y la factibilidad, adjudicando la técnica como muy necesaria y bastante factible, resultados que van acorde con los conocimientos aprendidos en 4° de ESO. Llama la atención como en cambio los alumnos de 2° aunque piensan que la técnica es peligrosa, creen que es poco necesaria y factible. Atendiendo a los argumentos, el mayor porcentaje de justificaciones positivas se presentan en los grupos de ciencias, en cambio, las pocas justificaciones del grupo no científico, son de carácter negativo.

2. La secuenciación del genoma es la técnica que más se repite en un contexto cotidiano, probablemente debido a toda la información que nos llega a través de los medios de comunicación o en series basadas en aspectos criminalistas. Por este motivo, los grupos del itinerario Científico ven la técnica muy factible. Sin embargo, los alumnos de 1° de Bachillerato del itinerario Humanístico creen que es poco factible y curiosamente la mayoría de alumnos de 2° creen que es bastante peligrosa.
3. En cuanto a la edición genómica, únicamente los alumnos de 2° de Bachillerato son conscientes de la peligrosidad de la técnica. Los resultados son bastante similares entre grupos, a excepción de la necesidad de la técnica, donde los alumnos del itinerario Científico son de la opinión de su gran necesidad para la cura de enfermedades.
4. A pesar de la instrucción, los alumnos siguen teniendo problemas en la identificación del ADN en distintos tipos celulares. Es muy preocupante que el porcentaje de aciertos sea muy similar en todos los grupos, es decir, alumnos de itinerarios Científicos y no Científicos.
5. Los alumnos no tienen problemas en identificar la expresión de genes a factores genéticos y ambientales, pero el porcentaje de aciertos disminuye considerablemente cuando se trata de caracteres modulados por ambos factores. No hay diferencias entre grupos en el caso de caracteres como la estatura, la cual erróneamente la clasifican por estar determinado por el ambiente y no ven modulación entre ambos factores. Por tanto, estos resultados pueden estar relacionados con la poca referencia del determinismo genético en los libros de texto y en la instrucción.
6. Cuando se evalúa sobre las cuestiones éticas de los nuevos avances sobre clonación, secuenciación y edición del genoma, las diferencias si son significativas entre los grupos de diferente itinerario.

Desarrollo del aprendizaje basado en la argumentación en ciencias

Participantes

La investigación se llevó a cabo con uno de los grupos del apartado anterior, en este caso fue el grupo de 2° de Bachillerato del itinerario de Ciencias de la Salud, constituido por un total de 18 alumnos en un total de 5 sesiones de 50 minutos cada una.

Desarrollo

Durante el transcurso de las 4 primeras sesiones, los alumnos recibieron clases magistrales, realizaron actividades de análisis de texto de forma cooperativa y utilizaron simuladores para conseguir un aprendizaje significativo sobre contenidos de genética para poder ser capaces de comprender los nuevos avances científicos.

Estas clases expositivas fueron apoyadas a través de un PowerPoint (*Anexo 2*); la distribución de las sesiones según los contenidos fue la siguiente (*Tabla 13*):

Tabla 13. Distribución de las cinco sesiones desarrolladas en 2° de Bachillerato

Sesiones	Contenido	Distribución
Sesión 1	Definición de mutaciones, clasificación y desarrollo de mutaciones puntuales	Clase expositiva (15 min) (<i>Anexo 2</i>)
		Actividad con simulación (35 min)
Sesión 2	Mutaciones cromosómicas y genómicas	Puesta en común actividad con demostración (20 min)
		Clase expositiva (30 min)
Sesión 3	Agentes mutagénicos y cáncer	Clase expositiva (25 min)
		Prueba de compatibilidad y debate (25 min)
Sesión 4	Mutación y evolución Avances científicos	Clase expositiva (10 min)
		Trabajo cooperativo de artículos científicos con material complementario (20 min)
		Puesta en común en el grupo (20 min)
Sesión 5	Debate ético sobre los avances científicos	Ritmo marcado por temas específicos

Simulación sobre mutaciones

Para apoyar el contenido expuesto sobre las mutaciones puntuales en la primera sesión, se propuso a los alumnos una actividad basada en una simulación virtual llamada Lab Concord. Para llevar a cabo esta actividad, se dividió a los alumnos en grupos de 3 personas, que disponían de un ordenador portátil y un documento con la explicación detallada, así como la imagen del código genético como material de apoyo (*Anexo 3*).

El objetivo de trabajar con esta actividad fue la observación de manera muy representativa del proceso de transcripción y traducción paso a paso, para después comprobar los efectos de la modificación del genoma tanto a nivel celular en la estructura de la proteína, como el efecto fenotípico en una hipotética enfermedad, aspectos que son descuidados y fomentan a menudo los errores conceptuales del alumnado, como por ejemplo la dificultad de relacionar los efectos del mundo microscópico con cambios fenotípicos (Iñiguez & Puigserver, 2013). También, permite la familiarización con la técnica de edición del ADN, campo en el que se han producido grandes avances en los últimos años, y que en las sesiones posteriores se trabajarían.

Durante la actividad, los alumnos tuvieron muchas dificultades porque no comprendían la justificación del efecto fenotípico en el caso hipotético. Fue necesario realizar una demostración con un ejemplo de mutación puntual para que pudieran continuar con la actividad. Sin embargo, en la puesta en común se pudo comprobar como todos comprendieron en que se basaba la actividad y las posibles consecuencias que se pueden dar tras una mutación puntual, tanto a nivel fenotípico como a nivel estructural de la proteína. Todo el alumnado estuvo participativo durante la actividad, y con gran disponibilidad de trabajo, además la mayoría afirmó que era una manera muy visual y facilitaba el aprendizaje.

Prueba de compatibilidad

En este grupo se propuso una alternativa para presentar las teorías evolucionistas de Darwin y Lamarck, basado en un estudio realizado en un Instituto de la Educación Secundaria (Jiménez & Muñoz, 2015). Una vez en el aula, se repartió a cada alumno una prueba de compatibilidad, basada en 4 preguntas con cuatro posibles respuestas, diseñadas como ideas afines a Lamarck, ideas afines a Darwin, ideas abstractas sobre evolución e ideas poco correctas o incompletas, y por último, la opción en la que no había ningún tipo de conocimiento o la respuesta era errónea (*Anexo 4*). Las preguntas hacían referencia al origen de las alas en las aves, del cuello largo en las jirafas, la resistencia a un insecticida de insectos y

a la posibilidad de herencia de un carácter no genético en ratones. Una vez finalizada la prueba tras 5 minutos de duración, los alumnos tenían que hacer un recuento de las respuestas.

Los alumnos que tenían un mayor número de respuestas de tipo a, pasaban a formar parte del grupo de los Lamarckianos. Por otro lado, los alumnos que tenían más respuestas de tipo b, pasaron a formar el grupo de los Darwinianos. En caso de empate, es decir, mismo número de respuestas tipo a y tipo b, se realizó una última pregunta sobre el caso de muchos seres humanos que no desarrollan muelas del juicio. Se propuso como posibles respuestas:

- a) Las muelas del juicio están en desuso porque no se necesitan (Lamarck).
- b) Las muelas del juicio han desaparecido en muchas personas debido a que se ha producido una mutación (Darwin).
- c) Algunas personas no desarrollan las muelas del juicio debido a la evolución (Idea abstracta).
- d) Aquellas personas que no desarrollan muelas del juicio es porque sus padres tampoco las han desarrollado (Error conceptual).

De esta manera, la clase quedó dividida en dos grupos, aquellos que apoyaban la postura de Lamarck, y aquellos que eran más afines a las ideas de Darwin. Para poder argumentar y debatir entre los dos grupos, se repartió documentación con ejemplos demostrados científicamente afines a cada postura (*Anexo 5*). Durante el debate, los alumnos tenían que defender sus ideas, y en el caso de cambio de opinión, los alumnos cambiaban de bando. Previamente a la argumentación, se explicaron las principales características y los postulados que defendieron Darwin y Lamarck.

Resultados y discusión

Los resultados tras la realización de la prueba de compatibilidad fueron los siguientes (*Figura 11*).

Llama la atención que únicamente en la última pregunta (cola de ratones), el mayor porcentaje es aquel que hace referencia al pensamiento de Darwin sobre las teorías evolucionistas, aun siendo una de ellas el ejemplo del cuello de las jirafas, cuestión que aparece prácticamente en todos los libros de texto donde tratan la Evolución (To, Tenenbaum, & Hogh, 2017). En el resto de las preguntas, la opción referente al pensamiento de Lamarck es una de los mayores porcentajes.

Los alumnos argumentaban que los caracteres aparecen por uso o desuso de las estructuras implicadas. Así, la mayoría de alumnos no relacionaron el concepto de mutación

con la evolución y en cambio o tienen una idea errónea o abstracta sobre esta cuestión. Además, cabe destacar el alto porcentaje de pensamiento abstracto en la pregunta sobre las alas de las aves, donde la mayoría de alumnos relacionan el hecho de poseer alas a la evolución, pero el argumento es incompleto.

En el caso de la tercera pregunta, sobre la plaga de insectos, tal y como se obtuvo en los resultados del artículo de referencia (Jiménez & Muñoz, 2015), es la pregunta que mayor porcentaje tiene del pensamiento de Lamarck. Se puede concluir que, aquellas cuestiones más abstractas y que más se alejan de lo cotidiano, son las que mayores dificultades presentan para los alumnos. En cambio, en la última pregunta, más común y cotidiana, el porcentaje más alto hace referencia al pensamiento de Darwin; durante la explicación surgió el ejemplo de las colas y orejas de los perros en el que se habían basado para contestar.

Únicamente un alumno (5,56 %) tuvo todas las respuestas relacionadas con el perfil de la teoría de la evolución de Darwin.

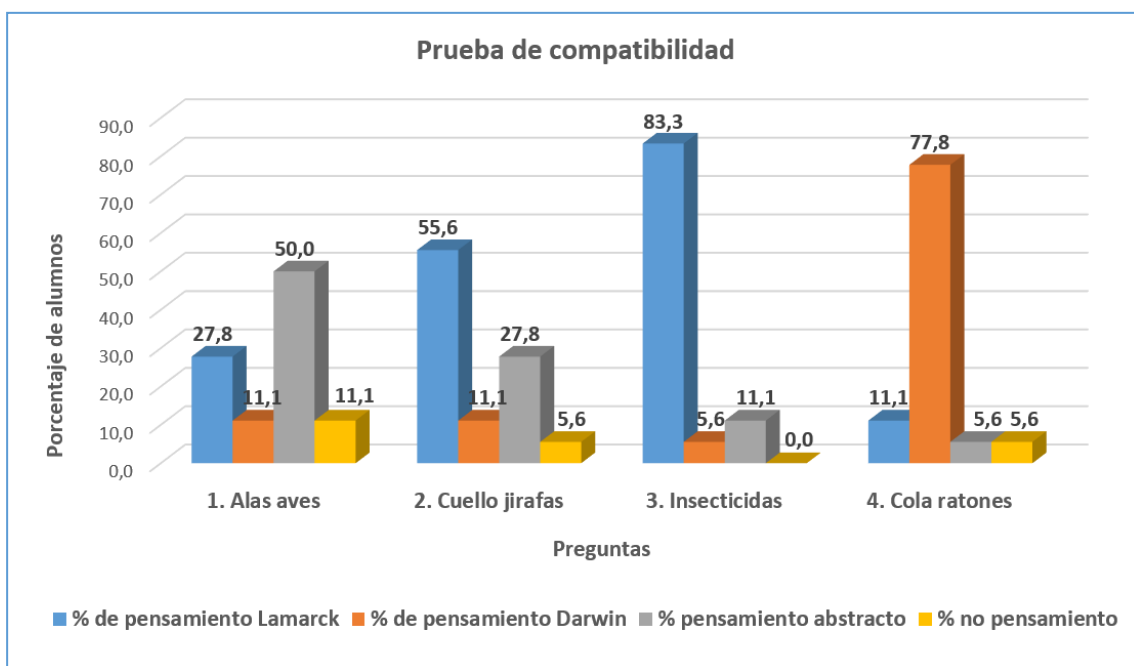


Figura 11. Porcentaje de alumnos de 2º de Bachillerato para cada una de las preguntas de la prueba de compatibilidad

Tras la división en dos grupos, 10 tuvieron mayor número de respuestas acorde con el pensamiento de Lamarck, 2 alumnos tuvieron mayor número de respuestas relacionadas con el pensamiento de Darwin, es decir, el 11,11 % de la clase. Curiosamente, los 6 alumnos restantes que tenían el mismo número de respuestas de tipo Lamarck y Darwin a los que se le hizo una quinta pregunta para desempatar sobre la existencia de las muelas del juicio, fueron para el grupo de los Lamarckianos.

En el debate, cada grupo exponía los ejemplos (anexo 5) e intentaba argumentar por qué su teoría era más válida explicando al mismo tiempo las respuestas dadas en el test. Tras la explicación por parte de los Darwinianos de la pregunta sobre las alas de las aves, 3 alumnos del grupo de los “Lamarckianos” decidieron cambiarse al de los “darwinianos”. Después de la explicación de la segunda pregunta sobre el cuello de las jirafas, 5 alumnos rectificaron y pasaron al grupo de Darwin, formando así el 55,56%. Tras la justificación de la tercera pregunta, sobre insecticidas, el grupo de los Darwinianos estaba formado por un 78% del alumnado. Sin embargo, 4 alumnos, seguían sin modificar o rectificar su planteamiento inicial y sus argumentos defendiendo la teoría evolucionista de Lamarck se mantuvo durante toda la sesión.

En el transcurso del debate, muchos argumentaban que el medio provocaba los cambios sin producir cambios genéticos. Además, muchos dudaban sobre la relación de las mutaciones con la evolución. Su aparición espontánea en la mayoría de los casos o inducida por agentes mutagénicos, era un hecho que generaba duda, debido a su incapacidad de observarlo a simple vista (Ruiz et al., 2017). También tenían dificultades en comprender los conceptos de adaptación y evolución. Durante el debate, los alumnos presentaron diversos ejemplos de evolución como la capacidad del *Homo Sapiens*, de mantenerse erguido como ahorro de energía, lo que justificaba una mayor probabilidad de capacidad reproductiva.

Como dijeron los investigadores Jiménez y Muñoz en su trabajo sobre hipótesis evolutivas, los alumnos normalmente se postulan a favor de Lamarck, ya que intuitivamente es más fácil de entender, idea defendida por investigadores internacionales (To et al., 2017). Sin embargo, a partir de sus resultados concluyeron que esta tendencia tiende a disminuir en los cursos superiores, hecho que curiosamente no ha ocurrido en nuestro trabajo.

Por otra parte, analizando la calidad de los argumentos, sin un guion claro y una preparación, pocos alumnos son capaces de argumentar o de hacerlo con calidad, repitiéndose en varias ocasiones a lo largo del debate, y teniendo poca capacidad de modificación.

Preparación del debate

En la cuarta sesión se dividió a los alumnos de 2° de Bachillerato en grupos de 3 personas. En cada grupo se proclamó un experto sobre cada uno de los temas a debatir, el cual tenía que trabajar con los expertos sobre su tema un artículo de prensa sobre un avance científico. Tras haber trabajado con el grupo de expertos durante 20 minutos, el alumno o alumna tenía que volver a su grupo de origen, para explicar a sus otros dos compañeros en qué consistía su tema. Las cuestiones en los que se basaban los artículos eran clonación, secuenciación y edición genómica (Domínguez, 2018; Rodríguez, 2017; Sampedro, 2018).

En primer lugar, el primer artículo trata sobre el caso de los primeros monos clonados utilizando la técnica de la Oveja Dolly. Debido a las clases expositivas sobre las mutaciones, el segundo artículo relaciona la detección de mutaciones con la técnica de secuenciación del genoma. Por último, el tercer artículo resume el sistema CRISPR de edición genómica atendiendo a sus principales aplicaciones y cuestiones éticas.

Para facilitar la comprensión, cada artículo tenía asociado un material complementario. Este material estaba constituido por imágenes descriptivas y muy visuales para apoyar el contenido de cada artículo (Anexo 6).

Se facilitó a cada uno de los alumnos un documento (Anexo 7) para construir sus argumentos respecto a cada uno de los temas para el debate. Esta ficha se diseñó en base al modelo argumentativo de Toulmin (Figura 12) (Mejía, González, & García, 2013).



Figura 12. Modelo argumentativo de Toulmin (Mejía, González & García, 2013)

Evaluación final

Por un lado se evaluaron los argumentos contruidos en el debate por parte del alumnado, y por otra parte, se volvió a realizar el mismo cuestionario previo de genética tras finalizar toda la unidad para evaluar si se había conseguido el objetivo inicial. Este hacía referencia a que el conocimiento condiciona la actitud, es decir, queríamos comprobar si tras unas sesiones para alcanzar una comprensión sobre los nuevos avances científicos, los alumnos cambiaban de opinión o no, y eran capaces de entender en que consistían, estableciendo un juicio crítico sobre ellos.

La comparación entre los argumentos a favor y en contra de estas tecnologías del alumnado, en el formato de Toulmin y el análisis de sus justificaciones, permite discutir aspectos como la relación entre conceptos y los valores, o las jerarquías establecidas entre estos últimos. Los criterios que se tuvieron en cuenta para evaluar el debate son (Jiménez & Diaz de Bustamante, 2003):

- ¿Qué cuenta como dato, como comprobación para los estudiantes?
- ¿Qué cuenta como conclusión o explicación teórica?
- ¿Qué cuenta como justificación en apoyo de una conclusión? ¿En qué situaciones utilizan justificaciones los estudiantes? ¿Qué tipo de justificaciones?
- ¿Cómo se relacionan las justificaciones con el conocimiento básico que las respalda?
- ¿Qué proceso siguen para argumentar mientras están resolviendo el problema?

Debate

Para llevar a cabo el análisis de los argumentos contruidos por parte de los alumnos de 2º de Bachillerato se tuvieron en cuenta una serie de aspectos como: los datos que se utilizaron, la conclusión o explicación teórica respecto a ese nuevo avance científico, y que tipo de justificación utilizaron para apoyar dicha conclusión. También se analizaron la relación de estas justificaciones con el conocimiento básico que tenían los alumnos, y por último, que tipo de proceso siguieron los alumnos para argumentar para resolver el problema. Este análisis se desarrolló a lo largo del transcurso del debate, y el posterior análisis del documento de diseño argumentativo de determinados alumnos poco participativos en el debate, cuyos razonamientos fueron muy interesantes sin ser expuestos oralmente. El análisis fue de carácter interpretativo, basándose en anteriores investigaciones (Jiménez & Diaz de Bustamante, 2003), pudiendo haber otras posibilidades existentes.

Durante la sesión de debate los estudiantes utilizaron como dato/hecho el título de los diferentes artículos, a excepción del artículo referido a las mutaciones en el cerebro, donde la

mayoría de los alumnos partieron del hecho de la existencia de la tecnología de secuenciación del genoma. Se dividieron las respuestas en tres grupos:

1. Enunciados con estatus provisional. Un ejemplo de ello sería la respuesta que dio un alumno: 'puede que se haya descubierto una técnica innovadora para la edición genómica'. Sólo otros dos alumnos dieron una respuesta de este tipo, lo que daría un 16,6 %.
2. Hecho aceptado. En este apartado se agruparon las respuestas de tipo 'se ha descubierto una nueva tecnología de edición del genoma'. La mayoría de respuestas podrían reflejar esta tendencia.
3. Conocimiento implícito. Sería una respuesta en la cual implicaría un conocimiento del contenido, como la respuesta que dio un único alumno 'La tecnología CRISPR basada en el mecanismo de defensa de las bacterias, abre las puertas a la nueva era de edición del genoma, permitiendo activar y desactivar genes de una manera fácil, barata y sencilla'.

Por otro lado, en cuanto a la justificación, la mitad del alumnado razonaba según su cultura escolar, opuesta a la cultura científica que se quería alcanzar en el debate. Se trataban de argumentos simples, basados meramente en el contenido trabajado en los artículos, y con poca capacidad de opinar. Se observó una clara tendencia por parte de estos alumnos, aproximadamente el 50 %, a razonar basados en los hechos expuestos en los artículos, es decir, tuvieron una gran dependencia entre la argumentación y el contenido. No fueron capaces de utilizar otros hechos distintos a los presentados para justificar su posición.

Sin embargo, un 25 % del grupo, basaba sus justificaciones en argumentos substantivos, es decir, que requieren el conocimiento del contenido, lo que se denomina la utilización de la tecnología científica (Jiménez & Díaz de Bustamante, 2003). El otro 25 %, construyó sus argumentos basados en una descripción, a través de sucesivas repeticiones del mismo contenido, donde en ningún caso eran capaces de argumentar su justificación apoyándose en otra.

Respecto a los tres principales temas del debate, los alumnos tomaron posturas a favor o en contra, sin embargo prácticamente una totalidad, expusieron excepciones a estas posturas. Ejemplo de ello, son las siguientes imágenes que representan el modelo de construcción de argumentos de aquellos estudiantes poco participativos, pero con buenas ideas (*Figuras 13- 15*).

Hechos	Clonación de los primeros monos en china
Justificación	No apoyo este hecho/descubrimiento porque lo veo innecesario y caro. Ya que en la actualidad existen mecanismos más éticos como la edición genética por CRISPR, donde se corren menos riesgos
Excepciones	Sin embargo, me parece una buena técnica si su uso se restringe exclusivamente al nacimiento de especies en el peligro de extinción
Modalidad	Probablemente se debería de reducir las investigaciones con animales y en algunos casos sería necesario su prohibición
Conclusión	Me resisto a mi rechazo a esta técnica innecesaria en la mayoría de los casos, a la cual se pierde mucho tiempo y dinero a la actualidad y es ineficiente en muchos estudios

Figura 13. Ejemplo de respuestas de una alumna de 2° de Bachillerato para la construcción de argumentos para el debate sobre clonación

Hechos	La utilización del mecanismo de la tecnología crispr
Justificación	me parece positiva y un gran avance para la sociedad, ya que permite acabar con enfermedades hereditarias con la posibilidad de activar o inactivar genes de manera fácil, rápida y barata.
Excepciones	Excepto cuando su uso esté dirigido a la fecundación in vitro de bebés a la carta (características genotípicas determinadas)
Modalidad	Probablemente si fuera efectiva la modificación de células germinales (óvulos y espermatozoides), estaríamos ante la posibilidad de erradicar posibles enfermedades congénitas.
Conclusión	En mi opinión este es un gran avance siempre y cuando su uso sea como último recurso para tratar bebés con enfermedades hereditarias

Figura 14. Ejemplo de respuestas de una alumna de 2° de Bachillerato para la construcción de argumentos para el debate sobre CRISPR y su técnica de edición genómica

Hechos	Tecnología innovadora basada en la secuencia genómica
Justificación	creo que esta técnica es fundamental ya que permite detectar posibles mutaciones somáticas que tienen como consecuencia la aparición del cáncer
Excepciones	Excepto en otras ocasiones donde las mutaciones pueden derivar a otras enfermedades o simplemente no tener efectos genotípicos
Modalidad	con toda seguridad esta tecnología es un gran avance para detectar posibles enfermedades, pero puede que muchos pueden acceder a esta técnica y después no sepan que hacer con los resultados.
Conclusión	Creo que el uso de esta metodología facilita la detección de muchas enfermedades y además no tiene consecuencias negativas

Figura 15. Ejemplo de respuestas de una alumna de 2° de Bachillerato para la construcción de argumentos para el debate sobre secuenciación genómica

Durante la sesión del debate, todas las ideas que surgieron estaban relacionadas con el mundo de las enfermedades y la medicina, sin embargo, ninguna opinión hacía referencia a la mejora o alteración de cultivos y plantas, y tampoco a la modificación del ganado genéticamente para mantenerlo más saludable.

En varias ocasiones surgió el debate sobre los beneficios de la técnica de CRISPR para acabar con enfermedades humanas como el cáncer, reemplazando esa parte del ADN con una correcta secuencia, tema que ocupó una gran parte de la sesión. También surgieron opiniones contrarias sobre la utilización de CRISPR para alterar el proceso de envejecimiento, acercándose al sueño eterno de la "eterna juventud". Sin embargo había ideas opuestas, que contrargumentaban este hecho como antinatural y la posibilidad de disfrutar sólo unos pocos de esta ventaja.

A continuación surgió la idea de la capacidad de modificar las características del cuerpo por razones estéticas, y la posibilidad de la existencia de niños a la carta, donde una gran mayoría estaba en contra sobre la posibilidad de esta práctica. Un alumno afirmó respecto a este tema que la idea de moldear los bebés genéticamente para diseñarlos al gusto de sus padres, le parecía macabro y antinatural, además, de ser legal, sería solo alcanzable para personas con alto poder adquisitivo, es decir, solo para unos pocos.

Un gran número de alumnos estaban totalmente en contra de la investigación actual con embriones humanos, concluyendo que deberían de investigar otras técnicas en las cuales no se emplee este tipo de muestras. Por el contrario, algunos alumnos estaban a favor de la modificación del genoma en los embriones, siempre y cuando su objetivo fuera acabar con una enfermedad hereditaria.

Prácticamente por unanimidad, los alumnos afirmaban tener una postura en contra de la clonación de especies animales, y sobre todo en humanos, recalcando que lo veían innecesario. El debate sobre la técnica de la clonación se presentó a través del caso de una actriz, Barbra Streisand, la cual pagó una gran cantidad de dinero para obtener dos clones de su perro enfermo terminal de cáncer. El rechazo ante esta técnica se apoyó en el descubrimiento de la metodología de CRISPR, más eficaz, barato y sencillo, con grandes perspectivas de futuro y con menos consecuencias negativas a priori.

Todo lo contrario ocurrió con la secuenciación genómica, donde todos los alumnos estaban a favor de que se produjeran este tipo de técnicas, porque presenta grandes ventajas para la detección de enfermedades genéticas. Ante la posibilidad de secuenciar el genoma de cada uno de los alumnos, muchos estaban a favor y afirmaban tener disposición de hacerlo en

algún momento de sus vidas para conocer esta información. Ante este tipo de razonamientos, varios alumnos contrargumentaban su postura, defendiendo que ninguno de ellos iba a ser capaz de entender esos resultados y que ninguno tiene la necesidad de recibir dicha información.

Nos llamó la atención como muchos alumnos tuvieron dificultades a la hora de argumentar una excepción a su opinión sobre una determinada técnica siguiendo el Modelo de Toulmin.

En el proceso de argumentación, las operaciones cognitivas permitieron cualificar los razonamientos del alumnado, y por otra parte, se tomaron posturas críticas y se propusieron posibles soluciones sociocientíficas que nos afectan a todos. Por último prácticamente una totalidad de alumnos expusieron su cambio de opinión respecto a muchos temas (*Figura 16*).

Si no sabía que siguiera surgiendo animales clonados en la actualidad, pensaba que el único caso en el mundo fue la oveja Dolly. Tampoco sabía a qué consistía la técnica de clonación (transfeción nuclear)

Sí, ha cambiado. Puesto que antes de leer el artículo sobre esta técnica, no sabía de su existencia. Ahora sé en qué consiste, como funciona y sus consecuencias. También sé que todavía están en ensayos clínicos en embriones. Me llama mucho la atención como un mecanismo de bacterias puede ser tan efectivo en el ser humano.

Figura 16. Respuestas de cambio de opinión de dos alumnas respecto a determinados avances científicos

Tal y como se esperaba, la lectura de textos ha beneficiado el aprendizaje basado en la argumentación (Márquez & Prat, 2010), favoreciendo el aprendizaje significativo de los nuevos avances científicos.

Sabemos que no es fácil aumentar la capacidad de comprender contenidos complejos y actuales sobre genética, pero a través de una intervención en el aula y su posterior práctica de un debate, se ha conseguido que los alumnos formulen argumentos de naturaleza científica y transferirlos a una manera de actuar comprometida y crítica con la ciencia.

Por otra parte, siguiendo las pautas de trabajos sobre argumentación (Jiménez & Díaz de Bustamante, 2003), se ha demostrado como los argumentos con la ayuda de un guion establecido han sido más coherentes y de gran calidad. Acorde con los resultados de dicho trabajo, en nuestro caso, también se pudo clasificar claramente los argumentos del alumnado entre enunciados con estatus, hechos aceptados y conocimiento implícito, siendo también este último, el menos predominante en los alumnos.

Resultados test de genética final

Para analizar si se ha conseguido una alfabetización científica en los alumnos de 2º de Bachillerato, se volvió a realizar el test sobre cuestiones de genética y los nuevos avances relacionados con esta área. En el caso de la pregunta 1, tras realizar un test de *Wilcoxon*, hubo grandes diferencias significativas, tanto en cuanto a cambio de opinión (*Figuras 17-19*), como en las justificaciones (*Tabla 14*), ya que prácticamente un cuarto del alumnado en el test inicial no contestaron en la parte de desarrollo, sobre todo en el caso de la secuenciación. Para comprender los resultados se tiene que tener en cuenta la escala *Likert* utilizada donde: nada corresponde al valor 1, poco al 2, bastante al 3 y muy al 4.

En el caso de la técnica de clonación, únicamente se observan diferencias significativas en el caso de la factibilidad ($p=0,006$). Si observamos la tendencia de las respuestas (*Figura 17*), podemos observar como una parte de los alumnos han cambiado de opinión.

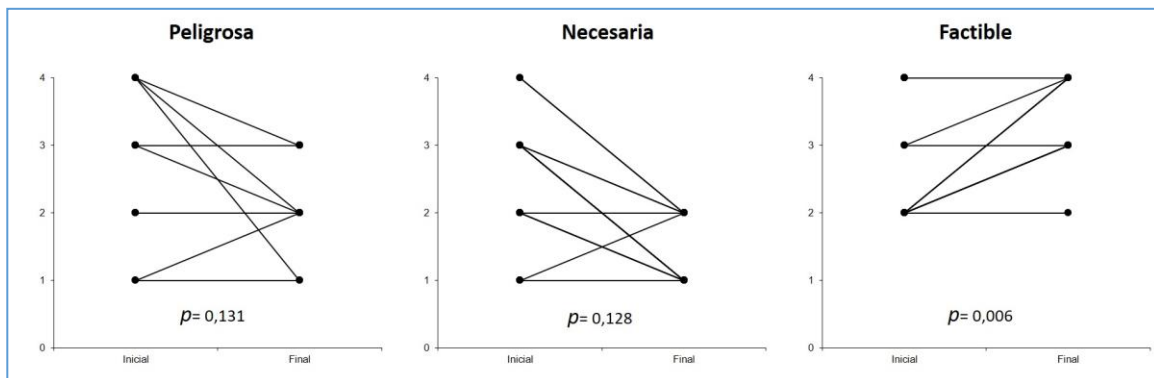


Figura 17. Diferencia entre las respuestas iniciales y finales sobre clonación

Atendiendo a las respuestas sobre secuenciación del genoma (*Figura 18*), hay diferencias significativas en las tres cuestiones. Se ha producido el cambio de actitud que esperábamos, es decir, donde la opinión mayoritaria al final de la intervención en el aula, es relacionar la secuenciación como una técnica poco peligrosa ($p=0,007$), muy necesaria ($p=0,023$) y factible ($0,004$), sobre todo en el caso de la detección de enfermedades (*Tabla 14*).

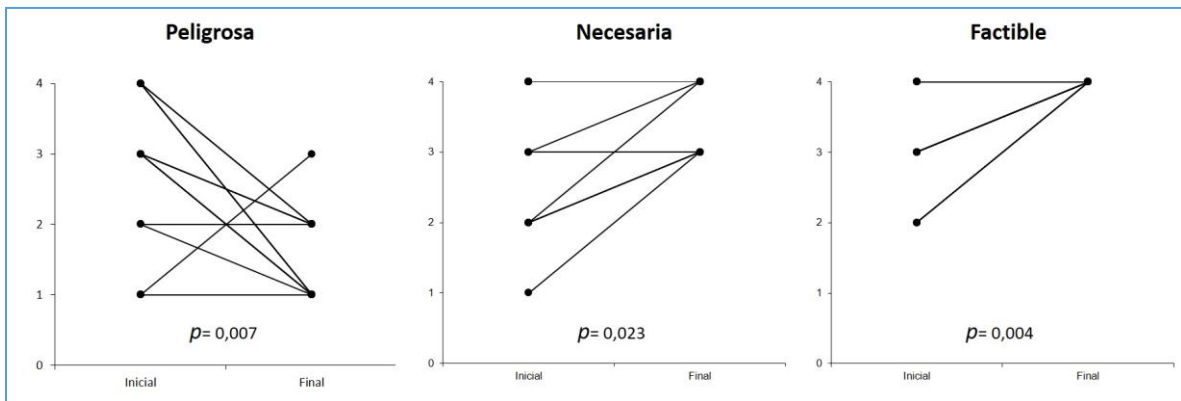


Figura 19. Diferencia entre las respuestas iniciales y finales sobre secuenciación del genoma

Por último, en el caso de la técnica de edición del genoma (Figura 19), hay diferencias significativas en el cambio de actitud sobre la peligrosidad y necesidad de esta técnica ($p=0,003$).

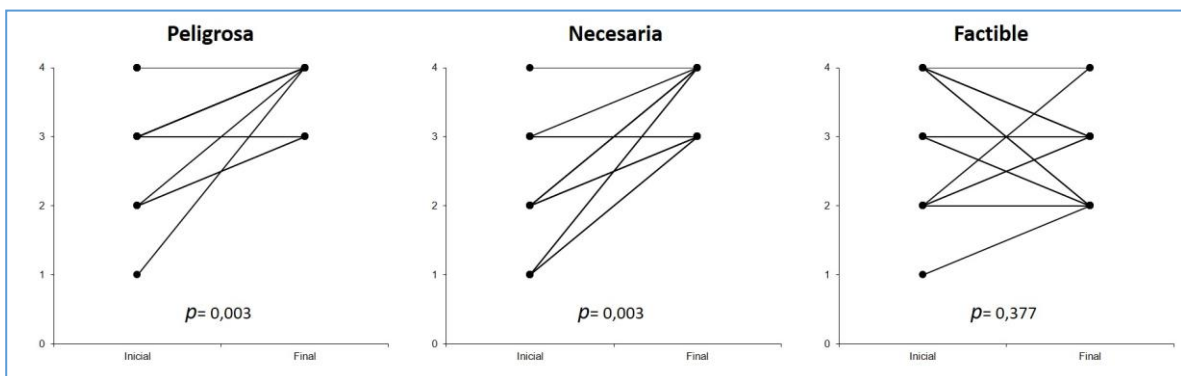


Figura 18. Correlación entre las respuestas iniciales y finales sobre edición del genoma

Analizando los resultados en cuanto a la opinión sobre los diferentes avances científicos (Tabla 14), se puede observar diferencias significativas prácticamente en todos los ejemplos y aspectos a opinar. Los únicos ejemplos en los cuales no se observan diferencias significativas es en el caso de la peligrosidad y necesidad de la clonación, debido a que la gran mayoría inicialmente adjudicaban una alta peligrosidad de la técnica alegando su baja capacidad de supervivencia de las especies, y sin embargo en el test final justificaban su peligrosidad por la posibilidad de poner en riesgo la variabilidad genética de las poblaciones de seres vivos. Tampoco se observan diferencias significativas en la factibilidad de la edición del genoma, ya que la mayor parte de los alumnos ya conocían que era posible modificar el genoma.

Por lo tanto, podemos concluir que los alumnos han cambiado su opinión después de trabajar estos contenidos mediante un trabajo cooperativo y mantener un debate en el aula. Además, este hecho se puede corroborar atendiendo a los resultados de las preguntas de desarrollo (Tabla 14), donde los argumentos son coherentes en relación a los datos analizados.

Tabla 14. Justificaciones de los alumnos de 2º bachillerato en los test iniciales y finales

	Pregunta 1	Inicial	Final	Variación
Clonación	Especies peligro de extinción	10	14	+4
	Obtención Células madre	12	18	+6
	Alto precio	4	10	+6
	Poca supervivencia	9	3	-6
	Descendencia con malformaciones	1	0	-1
	Variabilidad genética en riesgo	6	16	+10
	Sin argumento	0	0	-
Secuenciación del genoma	Detección enfermedades	12	18	+6
	Detección mutaciones	5	18	+13
	Comprensión del funcionamiento del cuerpo	3	0	-3
	Nombra el método Sanger	1	11	+10
	Ejemplos prácticos	8	15	+7
	Sin argumento	6	0	-6
Edición del genoma	Diferencias entre secuencias de ADN y su consecuencia	3	10	+7
	Corrección mutaciones	11	18	+7
	Cura de enfermedades	17	18	+1
	Difícil modificar el ADN de cada célula	0	0	-
	Niños a la carta	3	15	+12
	Sin argumento	1	0	-1

Los criterios en color verde representan las justificaciones positivas, en rojo las opiniones negativas y en naranja las respuestas en blanco (sin argumento).

Analizando las respuestas, podemos observar como las opiniones positivas relacionadas con las técnicas han aumentado considerablemente en todos los casos, en los cuales, prácticamente una totalidad del alumnado ha utilizado dichas ideas para justificar sus respuestas.

Retomando la cuestión sobre la necesidad de la secuenciación del genoma, los alumnos a pesar de cambiar su opinión tendiendo a una gran necesidad de la técnica, son capaces de argumentarlo como una excepción para la utilidad en medicina. Al ser conscientes del funcionamiento de la técnica, y la complejidad posterior del análisis de los datos, consideran que los ciudadanos en general no precisan esa información salvo en el caso de enfermedades. En este mismo caso, nos llamó la atención el hecho de que fuera el mayor porcentaje de respuestas sin argumentos, siendo la técnica que más se realiza y que aparece en los medios de comunicación en cualquier caso criminalista a diario. Atendiendo al número de respuestas en blanco, en el caso del test final, los 18 alumnos justificaron sus respuestas, por lo que se puede concluir que el trabajo cooperativo y el posterior debate sobre los nuevos avances científicos ha ayudado a los alumnos a comprender sus fundamentos y a establecer un juicio crítico sobre ellos.

Se analizaron las preguntas 3, 4, 5 y 6 a través del test *McNemar*. En el caso de las respuestas en la pregunta 2, los resultados fueron también positivos, se pudo observar como prácticamente el 100 % del alumnado identificó la presencia de todos los elementos en los tipos celulares presentes en la especie humana (*Anexo 8*). Sin embargo, el porcentaje desciende más de un 20 % cuando se trata de tipos celulares más alejadas de lo común, como el caso de los pétalos de la flor o la bacteria y el virus, aspectos que generan más confusión en los alumnos (Ruiz et al., 2017). Se mantiene también la tendencia del test del inicio, donde los alumnos tienen más dudas cuando se trata del virus.

En el caso de las preguntas 3 y 4, se produjo también un 100 % de aciertos (*Anexo 8*). En la pregunta sobre clonación, en concreto, sobre la Oveja Dolly, sí hubo diferencias significativas, en cambio en la pregunta sobre expresión (pez Mendaka), no, debido a que el porcentaje de aciertos en el test inicial fue de un 61 % frente al 100 % del test final.

Sin embargo los resultados de la pregunta 5 (*Anexo 8*), prácticamente se mantuvieron respecto al test inicial, donde el porcentaje de aciertos ya fue bastante alto. Es posible que los resultados se repitiesen debido a que a lo largo de las cinco sesiones no se trabajaron las cuestiones relacionadas con la influencia de los factores genéticos y ambientales en las diferentes características presentadas en la pregunta. Únicamente se citó en el caso de los perros clonados de la actriz en el debate. A pesar de este hecho, la cuestión sobre la estatura, ha disminuido el porcentaje de errores, pasando de un 66,7 % a un 55,6 %.

Para el análisis de la pregunta 6 se ha tenido en cuenta únicamente el porcentaje de aciertos frente al porcentaje de respuestas incorrectas y de duda mediante un test *McNemar*. En este caso los resultados también fueron favorables, ya que en el test de inicio sobre genética, hubo un alto porcentaje de respuestas incorrectas y de duda por parte del alumnado (*Tabla 15*), además se observan diferencias significativas en todas las cuestiones éticas a excepción de la pregunta de clonación ($p=0.063$). En el caso de esta cuestión, el porcentaje de respuestas correctas en el test inicial era el más alto.

En las cuestiones sobre mutación, sistema de CRISPR y clonación, hubo un 100% de respuestas acertadas. El porcentaje de errores disminuyó considerablemente, no superando en ningún ítem el 12 %. Por último, cabe destacar el gran descenso de respuestas incorrectas en el test final, donde en el caso de la pregunta sobre edición del genoma el porcentaje de respuestas incorrectas descendió desde el 44,4 % a un 16,7, y en el caso de la variación del genoma de un alto 72,2 a un mínimo 5,6 %, que simboliza a un único estudiante.

Se puede observar la gran eficacia de la propuesta, ya que ningún alumno de los que contestaron no saber en el test inicial, ha respondido erróneamente en la prueba final.

Tabla 15. Porcentaje de alumnos de 2° de Bachillerato del itinerario Científico con respuestas correctas, incorrectas o de duda ante los diferentes ítems

Pregunta 6	Respuestas correctas		Respuestas incorrectas		No saben		p
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	
Mutación	55,6	100,0	38,9	0,0	5,6	0,0	0,008
Edición del genoma	22,2	77,8	44,4	16,7	33,3	5,6	<0,001
Variación del genoma	5,6	88,9	72,2	5,6	22,2	5,6	<0,001
Epigenética	44,4	88,9	22,2	11,1	33,3	0,0	0,002
Mecanismo CRISPR	16,7	100,0	16,7	0,0	66,7	0,0	<0,001
Expresión de genes	55,6	88,9	27,8	11,1	16,7	0,0	0,008
Clonación	72,2	100,0	22,2	0,0	5,6	0,0	0,063

La opción más frecuente para cada criterio se marca en negrita, donde el color verde representa las respuestas correctas, en rojo las respuestas incorrectas y en azul las respuestas de duda. La casilla sombreada en azul marca las diferencias significativas.

Se puede comprobar también cómo tras una intervención en el aula basada en aprendizaje por argumentación, tal y como opinaban los expertos (Henaó & Stipcich, 2008), los alumnos de Bachillerato son capaces de comprender las cuestiones éticas de los nuevos avances científicos, adquiriendo un juicio crítico y favoreciendo la alfabetización científica (Latorre & Sanfélix, 2000).

Conclusiones

En el mundo de hoy, el de la ciencia y la tecnología, es fundamental la formación académica para la toma de decisiones informadas y fundamentadas. Esta perspectiva es inseparable de la enseñanza basada en la argumentación, que por un lado permite razonar adecuadamente con fundamento, y por otro lado, permite tomar posturas críticas y crear conclusiones en relación con cuestiones bioéticas. Incluir la capacidad de argumentación en los objetivos de la enseñanza de las ciencias significa, entre otras cosas: reconocer las complejas interacciones que tienen lugar en el aprendizaje, así como la contribución de las prácticas de construcción del conocimiento científico, teniendo en cuenta que hacer ciencia es también proponer y discutir ideas, y ampliar la visión del aprendizaje en ciencias. Todas estas cuestiones facilitan conseguir una alfabetización científica.

Cabe destacar la existencia de nuevos desafíos, como el desarrollo del aprendizaje basado en la argumentación, el cómo se aprende a razonar, la dependencia (o no) entre la argumentación y el contenido, la continuidad del currículo y su actualización. La alfabetización científica del alumnado y del profesorado son aspectos fundamentales que se deberían de llevar a cabo en la investigación didáctica. En cambio, pocos trabajos sobre aprendizaje basado en argumentación para la genética han salido a la luz (Tamayo & Cardona, 2013).

Bajo nuestro punto de vista, los libros de texto se deberían de actualizar en base a los nuevos avances científicos; un claro ejemplo es que en la actualidad se sigue describiendo el proceso de clonación a través del ejemplo de Dolly, primera oveja clonada en el año 1996. En ninguno de los libros de texto se citan las especies clonadas posteriormente. Además, prácticamente una totalidad de editoriales no tratan el determinismo genético y el concepto de mutación es incompleto, lo que aumenta los errores conceptuales que tienen los alumnos sobre cuestiones de genética (Caballero, 2008; Iñiguez & Puigcerver, 2013). Tras algunas nuevas propuestas alternativas de cómo enseñarla (Redfield, 2012), sin embargo, por los resultados de nuestro trabajo, podemos concluir que no están resultando del todo.

Es importantísimo recalcar el hecho de que es en 4º de ESO, únicamente en el itinerario Científico, donde se inician los conceptos sobre genética. Esto hace que muchos alumnos no llegarán a cursar asignaturas donde se impartan estos contenidos, y por tanto, como consecuencia de ello, esas ideas alternativas permanecerán, sin opción de ser trabajadas a lo largo de su estancia en la Educación Secundaria. Este aspecto se ha visto reflejado en nuestro estudio, donde hemos visto que un alto porcentaje de alumnos del itinerario no científico no son capaces de argumentar su postura frente a las nuevas tecnologías.

Tras la realización de este trabajo, se ha conseguido una mayor participación de los estudiantes en el discurso de las Ciencias, donde en base a los resultados obtenidos en el test final y en el transcurso del debate, se puede concluir que tras unas sesiones teóricas, un trabajo cooperativo y una sesión de debate, es decir, adquisición de contenidos conceptuales, procedimentales y actitudinales respectivamente, los alumnos son capaces de construir sus propios argumentos, razonando coherentemente y justificando su juicio crítico. Además, los argumentos construidos en el debate fueron lógicos y críticos en comparación con los de la prueba de compatibilidad, por lo tanto la ficha de apoyo para la construcción de argumentos marcó grandes diferencias entre ambos debates. Esta diferencia observada concuerda con los estudios sobre aprendizaje basado en la argumentación publicados (Jiménez & Díaz de Bustamante, 2003).

Una nueva puerta se abre en las aulas y en el campo de la didáctica de las Ciencias, donde los alumnos pueden alcanzar una alfabetización científica a través de un aprendizaje basado en la argumentación, para así, estar capacitados en el futuro ante posibles elecciones sobre contenidos relacionados con la genética.

Bibliografía

- Acerca Ciencia. (2015). Edición de genes y genomas: ¿La nueva revolución de la Biología? Retrieved from <http://www.acercaciencia.com/2015/12/18/edicion-de-genes-y-genomas-la-nueva-revolucion-de-la-biologia/>.
- Banet, E., & Ayuso, G. E. (1995). Introducción a la genética en la enseñanza secundaria y bachillerato : I. Contenidos de enseñanza y conocimientos de los alumnos. *Enseñanza de Las Ciencias*, 13(2), 137–153. Retrieved from <http://ddd.uab.cat/record/22698>
- Bugallo, A. (1995). La didáctica de la genética: revisión bibliográfica. *Enseñanza de Las Ciencias*, 13(3), 379–385.
- Caballero, M. (2008). Algunas ideas del alumnado de Secundaria sobre conceptos básicos de genética. *Investigación Didáctica*, 26(2), 227–244.
- Cañal, P., Cañal, P., Carmen, L., Barros, S. G., Jiménez-aleixandre, M. P., Márquez, C., ... Sanmartí, N. (2010). Didáctica de la biología y la geología. *Ministerio de Educación, II*.
- Cañal, P., Cano, M. I., Gutiérrez, A., Jesús, M., Arnedo, H., Jaén, M., ... De Pro, A. (2011). Formación del Profesorado. Educación Secundaria Serie: Didáctica de las Ciencias experimentales (Biología y Geología). Formación y Desarrollo Profesional. *Ministerio de Educación, 2*, 189.
- Castañeda, M. (2013). Aprender a enseñar conceptos sociales. La formación en Didáctica de las Ciencias Sociales en la carrera de Educación Básica de la Universidad de Playa Ancha. Estudio de Casos. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&site=eds-live&db=edstdx&AN=tdx.10803.113565> OP
- Charpentier, E., & Doudna, J. A. (2013). Biotechnology: Rewriting a genome. *Nature*, 495(7439), 50–51. <http://doi.org/10.1038/495050a>
- DECRETO FORAL 25/2007, de 19 de marzo, por el que se establece el currículo de las enseñanzas de la Educación Secundaria Obligatoria en la Comunidad Foral de Navarra. Boletín Oficial de Navarra número 65, de 25 de mayo de 2007.
- DECRETO FORAL 49/2008, de 12 de mayo, por el que se establece el currículo de las enseñanzas de la Educación Secundaria Obligatoria en la Comunidad Foral de Navarra. Boletín Oficial de Navarra número 70, de 6 de junio de 2008.
- DECRETO FORAL 24/2015, de 22 de abril, por el que se establece el currículo de las enseñanzas de la Educación Secundaria Obligatoria en la Comunidad Foral de Navarra. Boletín Oficial de Navarra número 127, de 2 de junio de 2015.
- DECRETO FORAL 25/2015, de 22 de abril, por el que se establece el currículo de las enseñanzas de Bachillerato en la Comunidad Foral de Navarra. Boletín Oficial de Navarra número 127, de 2 de junio de 2015.

- Domínguez, N. (2018). Científicos chinos crean los primeros monos clonados con la técnica de la oveja 'Dolly.' *El País*, 1–5. Retrieved from https://elpais.com/elpais/2018/01/24/ciencia/1516813473_483837.html?rel=str_articulo#1523461603751
- Fernandes, I. M., Pires, D. M., & Villamañán, R. M. (2014). Educación científica con enfoque ciencia-tecnología- sociedad-ambiente. Construcción de un instrumento de análisis de las directrices curriculares. *Formacion Universitaria*, 7(5), 23–32. <http://doi.org/10.4067/S0718-50062014000500004>
- Fernández, J. C. (2010). Glosario de términos y conceptos genéticos. *Encyclopedia of Genetics* 1-7. Retrieved from <https://doi.org/10.1006/rwgn.2001.0836>
- Gaj, T., Gersbach, C. A., & Barbas, C. F. (2013). ZFN, TALEN, and CRISPR/Cas-based methods for genome engineering. *Trends in Biotechnology*, 31(7), 397–405. <http://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.04.004>
- García, M. (2010). *A new insight into sanger's development of sequencing: From proteins to DNA, 1943-1977. Journal of the History of Biology* (Vol. 43). <http://doi.org/10.1007/s10739-009-9184-1>.
- Genetic Science Learning Center. (2016). Epigenetics and Inheritance. *Learn.Genetics*. Retrieved from <http://learn.genetics.utah.edu/content/epigenetics/inheritance/>
- González, F., & Tamayo, M. (2000). Sobre el origen de los conocimientos previos en Biología: Elementos comunes entre el alumnado y los libros de texto. *Revista de Educación de La Universidad de Granada*, (1), 13–199. <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Henao, B., & Stipcich, M. (2008). Educación en ciencias y argumentación : la perspectiva de Toulmin como posible respuesta a las demandas y desafíos contemporáneos para la enseñanza de las Ciencias Experimentales. *Revista Electrónica de Enseñanza de Las Ciencias*, 7, 47–62.
- Herráez, A., & Sánchez, A. (2012). Biología Molecular e ingeniería genética.(2a. ed). *Elvesier España, S.L.*
- Iñiguez, F., & 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*, 10(3), 307–327.
- Jiménez, M.P., & Muñoz, A. (2015). Análisis de las hipótesis evolutivas en alumnos de Educación Secundaria y Bachillerato. *Revista Electrónica de Enseñanza de Las Ciencias*, 14(1), 35–54.
- Jiménez, M. P., & Diaz de Bustamante, J. (2003). Discurso De Aula Y Argumentación En La Clase De Ciencias : Cuestiones Teóricas Y Metodológicas. *Enseñanza de Las Ciencias*, 21(3), 359–370.

- KhanAcademy. (2018). Secuenciación de ADN. Retrieved from <https://es.khanacademy.org/science/biology/biotech-dna-technology/dna-sequencing-pcr-electrophoresis/a/dna-sequencing/>
- Ley Orgánica 2/2003 de Educación, del 3 de mayo. Boletín Oficial del Estado número 106, de 4 de mayo de 2006, páginas 17158-17207.
- Ley Orgánica 8/2013, de 9 de diciembre. Boletín Oficial del Estado número 295, de 10 de diciembre de 2013, páginas 97858-97921.
- Márquez, C., Roca, M., & Sanmartí, N. (2009). Investigar en el campo de la Didáctica de las Ciencias: ¿Para qué? ¿Cómo? *Investigación En La Escuela*, 69, 31–43. Retrieved from http://www.investigacionenlaescuela.es/articulos/69/R69_3.pdf
- Mejía, L. S., González, J., & García, Á. (2013). La Argumentación en La Enseñanza de las Ciencias. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos.*, 9(1), 11–28.
- Moreno, S. P. (2001). El Papel De La Distribución De La Renta En El Crecimiento Económico, 20(3), 310.
- Mutt, M. (2013). Animales y plantas con historias. Ediciones digitales. Retrieved from <http://www.edicionesdigitales.info/imagenes/imagenes.pdf>
- Nelson, D., & Cox, M. (2008). Principios de Bioquímica (4a. ed). Madrid: *Ediciones Omega*.
- Pinterest. (2016). Proceso de Clonación de la Oveja Dolly. Retrieved from <https://www.pinterest.se/pin/11822017751048455/>
- Redfield, R. J. (2012). “ Why Do We Have to Learn This Stuff ? ”— A New Genetics for 21st Century Students. *PLOS Biology*, 10(7), 1–4. <http://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001356>
- Rodriguez, N. (2017). Una nueva técnica de edición genética corrige enfermedades en células humanas. *El País*, 1–4.
- Ruiz, C., Banet, E., & López, L. (2017). Conocimientos de los estudiantes de secundaria sobre herencia biológica : implicaciones para su enseñanza. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 14(3), 550–569. Retrieved from http://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2017.v14.i3.04.
- Sampedro, S. (2016). El cerebro es un mosaico de mutaciones. *El País*, 1-4.
- Shipman, S. L., Nivala, J., Macklis, J. D., & Church, G. M. (2017). CRISPR Cas encoding of a digital movie into the genomes of a population of living bacteria. *Nature*, 547, 345. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1038/nature23017>
- Solbes, J. (2007). El desinterés del alumnado hacia el aprendizaje de la ciencia: implicaciones en su enseñanza. *Didáctica de Las Ciencias Experimentales y Sociales*, 117(21), 91–117. <http://doi.org/10.7203/dces..2428>

- SteemitBeta. (2017). CRISPR: El Método de Edición Genética que Revolucionará la Ciencia. Retrieved from <https://steemit.com/spanish/@carlos-cabeza/crispr-el-metodo-de-edicion-genetica-que-revolucionara-la-ciencia>
- Tamayo, O. E.-A., & Cardona, D.-A. (2013). *Modelos de argumentación en ciencias: una aplicación a la genética*. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&site=eds-live&db=edsbas&AN=edsbas.ftclacso.oai.clacso.co.co.001.D8572>
- Tibell, L. A., & Rundgren, C.J. (2010). Educational Challenges of Molecular Life Science: Characteristics and Implications for Education and Research. *CBE Life Sciences Education*, 9(1), 25–33. <http://doi.org/10.1187/cbe.08>
- To, C., Tenenbaum, H. R., & Hogh, H. (2017). Secondary school students' reasoning about evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 54(2), 247–273. <http://doi.org/10.1002/tea.21347>
- Wang, F., & Qi, L. S. (2018). Applications of CRISPR Genome Engineering in Cell Biology. *Trends in Cell Biology*, 26(11), 875–888. <http://doi.org/10.1016/j.tcb.2016.08.004>

Anexos

Anexo 1: Cuestionario previo sobre genética

1. Indica cuál es tu opinión sobre las siguientes cuestiones con la ayuda de una escala del 1 al 4, haciendo referencia a nada, poco, bastante y mucho respectivamente. Razona tu respuesta.

La clonación es:

Nada peligrosa 1 2 3 4 Muy peligrosa

Nada necesaria 1 2 3 4 Muy necesaria

Nada factible 1 2 3 4 Muy factible

Justificación: _____

La secuenciación de tu propio genoma es:

Nada peligrosa 1 2 3 4 Muy peligrosa

Nada necesaria 1 2 3 4 Muy necesaria

Nada factible 1 2 3 4 Muy factible

Justificación: _____

La modificación de la secuencia de ADN es:

Nada peligrosa 1 2 3 4 Muy peligrosa

Nada necesaria 1 2 3 4 Muy necesaria

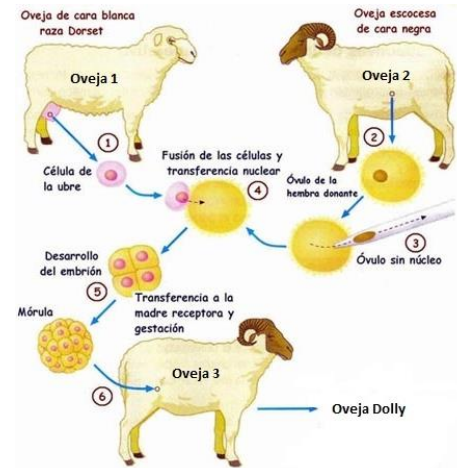
Nada factible 1 2 3 4 Muy factible

Justificación: _____

2. Indica con una X que elementos de los presentados en la primera columna poseen: información hereditaria, cromosomas, cromosomas sexuales, genes y ADN.

	Información hereditaria	Cromosomas/as	Cromosomas sexuales	Genes	ADN
Sangre					
Óvulo					
Célula muscular					
Hueso					
Prótesis de cadera					
Pétalos de una flor					
Bacteria					
Virus					

3. El científico escocés Ian Wilmut diseñó la máquina copiadora de ovejas, Tomó una célula de la ubre de una oveja adulta (oveja 1), le sacó el núcleo y lo introdujo en el óvulo de otra oveja (oveja 2). Después, implantó el óvulo manipulado de la oveja 2 en otra oveja hembra (oveja 3). La oveja 3 quedó preñada y tuvo un cordero: Dolly. [Imagen: (Pinterest, 2016)]



¿A qué oveja es idéntica Dolly? Sólo una opción es correcta.

- a) Oveja 1
- b) Oveja 2
- c) Oveja 3
- d) A su padre

4. En la última década, gracias a los avances científicos, se ha conseguido que el Pez Medaka, pase a llamarse Pez Frankenstein debido a que éste, ha adquirido un color verde fluorescente. Si sabemos que la medusa abisal es una de las pocas especies que tiene esta característica de manera natural.

¿Qué crees que ha podido ocurrir? Sólo una opción es correcta.

- a) La introducción completa del genoma de la medusa en el pez
- b) La reproducción sexual entre la medusa y el pez
- c) La introducción del gen codificante responsable del aspecto fluorescente en el pez
- d) La introducción de la proteína fluorescente en el pez

5. Indica con una X qué crees que influye más en las siguientes características.

	Factores genéticos	Factores ambientales	Modulación entre ambos factores
Grupo sanguíneo			
Estatura			
Cicatrices			
Lunares			
Acento al hablar			
Enfermedad cardiovascular			

6. Indica si estas afirmaciones son verdaderas o falsas,

En un organismo las células de la piel, las nerviosas y las musculares tienen diferentes funciones porque han sufrido distintas mutaciones.

- a) Verdadero
- b) Falso
- c) No sé

Es posible la edición del genoma de un individuo sin modificar la secuencia de su ADN.

- a) Verdadero
- b) Falso
- c) No sé

El genoma de un individuo no varía a lo largo de su vida.

- a) Verdadero
- b) Falso
- c) No sé

La activación o inactivación de genes siempre están relacionados con alteraciones en la secuencia de ADN.

- a) Verdadero
- b) Falso
- c) No sé

Utilizando el sistema de mecanismo de defensa de bacterias contra virus, es posible acabar con posibles enfermedades en embriones humanos.

- a) Verdadero
- b) Falso
- c) No sé

En un organismo las células de la piel, las nerviosas y las musculares tienen diferentes funciones porque expresan diferentes genes.

- a) Verdadero
- b) Falso
- c) No sé

Se considera clonación la obtención de un nuevo tejido a partir de una célula madre.

- a) Verdadero
- b) Falso
- c) No sé

Anexo 2: Diapositivas sesiones 2° de Bachillerato

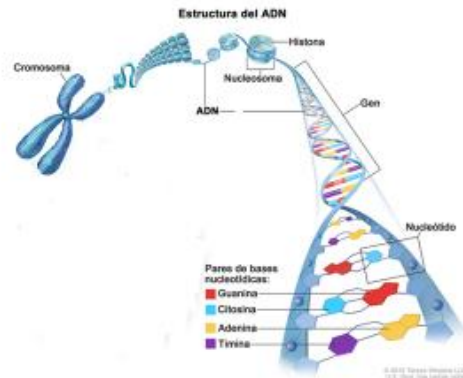


¿A qué nos referimos cuando hablamos de mutación?

Cualquier modificación introducida en una secuencia nucleotídica que es estable, es decir, permanece tras la replicación del DNA.



Hugo de Vries (1901), botánico holandés, estudió los cambios en la planta (*Oenothera lamarckiana*)



Nº de sesión	Contenido	Distribución
Sesión 1	Mutaciones puntuales	Clase expositiva (15 min) Actividad con simulación (35 min)
Sesión 2	Mutaciones cromosómicas	Puesta en común actividad con demostración (20min) Clase expositiva (30 min)
Sesión 3	Agentes mutagénicos y cáncer	Clase expositiva (30 min) Test de compatibilidad y debate (20min)
Sesión 4	Mutación y evolución Avances científicos	Clase expositiva (10 min) Trabajo de artículos científicos por grupos de expertos con material complementario (20 min) Puesta en común en el grupo (20 min)
Sesión 5	Debate ético sobre los avances científicos	Ritmo marcado por temas específicos

Clasificación de mutaciones

CRITERIO	TIPOS DE MUTACIONES
CÉLULAS AFECTADAS	Somáticas (no se transmiten a la descendencia)
	Germinales (se transmiten a la descendencia)
CAUSAS	Naturales o espontáneas
	Inducidas por agentes mutagénicos
EFECTOS	Beneficiosas
	Perjudiciales (letales, subletales y patológicas)
	Neutras
TIPO DE EXPRESIÓN GENÉTICA	Dominantes (respecto al alelo normal no mutado)
	Recesivas (respecto al alelo normal no mutado)
ALTERACIONES GENÉTICAS	Génicas (afectan a la secuencia de nucleótidos de un gen (ADN))
	Cromosómicas (alteración de la estructura de los cromosomas)
	Genómicas (alteración numérica de cromosomas)

Mutaciones génicas: puntuales

3 tipos

Sustitución de una base por otra distinta

Pérdida o por inserción de bases

Transposición (variaciones de lugar de algunos segmentos de ADN)

- **Transición:** cambio entre bases de la misma familia
- **Transversión:** cambio entre bases de diferente familia

Secuencia de ADN original
C A T C A T C A T

Transversión
C A T C C T C A T

Adición
C A T C A G G T C A T

Delección
C A T C C A T

Transiciones



Cambios de bases posibles

A → G
G → A

T → C
C → T

Transversiones



A → C
A → T
G → C
G → T

C → A
C → G
T → A
T → G



Mutaciones génicas: puntuales

TIPO DE MUTACIÓN	CONSECUENCIAS							
SIN MUTACIÓN	ADN	GAT	GGT	CGT	CAG	ACG	TCT	TGT
	ARNm	CUA	CCA	GCA	GUC	UGC	AGA	ACA
	Proteína	Leu	Pro	Ala	Val	Cys	Arg	Thr
	Simil lingüístico	dos	por	dos	son	más	que	uno
TRANSICIÓN	ADN	GAT	GGT	CGT	CGG	ACG	TCT	TGT
	ARNm	CUA	CCA	GCA	GCC	UGC	AGA	ACA
	Proteína	Leu	Pro	Ala	Ala	Cys	Arg	Thr
	Simil lingüístico	dos	por	dos	sen	más	que	uno
TRANSVERSIÓN	ADN	GAT	GGT	CGT	CCG	ACG	TCT	TGT
	ARNm	CUA	CCA	GCA	GGC	UGC	AGA	ACA
	Proteína	Leu	Pro	Ala	Gly	Cys	Arg	Thr
	Simil lingüístico	dos	por	dos	sin	más	que	uno
INSERCIÓN	ADN	GAT	GGT	CGT	TCA	GAC	GTC	TTG T
	ARNm	CUA	CCA	GCA	AGU	CUG	CAG	AAC A
	Proteína	Leu	Pro	Ala	Ser	Leu	Gln	Asn
	Simil lingüístico	dos	por	dos	so	nmá	sq	eun o
DELECIÓN	ADN	GAT	GGT	CGT	CAG	ACT	CTT	GT
	ARNm	CUA	CCA	GCA	GUC	UGA	GAA	CA
	Proteína	Leu	Pro	Ala	Val	Stop		
	Simil lingüístico	dos	por	dos	son			

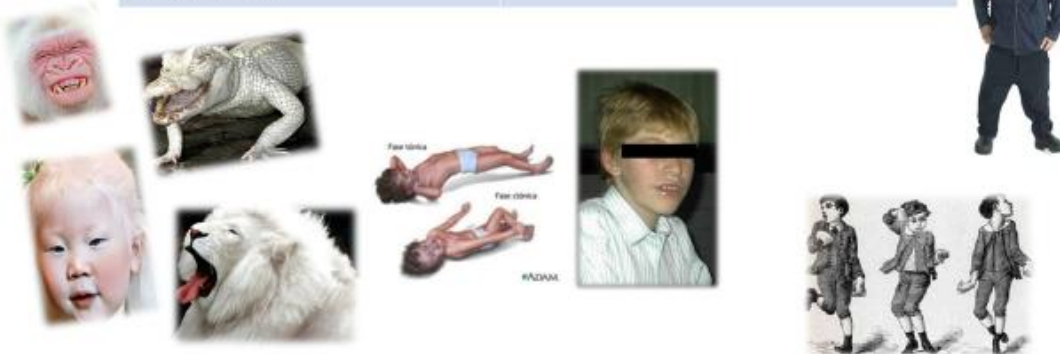
- Causas:**
- Errores de lectura en la replicación (ADN polimerasa III)
 - Lesiones fortuitas

Se ve afectado un único triplete

Desde ese punto varían todos los tripletes de bases

Mutaciones génicas: puntuales

Alelos mutantes recesivos	Alelos mutantes dominantes
<ul style="list-style-type: none"> • Anemia falciforme • Hemofilia • Albinismo • Fenilcetonuria 	<ul style="list-style-type: none"> • Corea de Huntington • Acondroplasia (una de las causas del enanismo)



Mutaciones génicas: puntuales

		Segunda Letra								
		U		C		A		G		
Primera Letra	U	UUU	Phe	UCU	Ser	UAU	Tyr	UGU	Cys	U
		UUC	Phe	UCC	Ser	UAC	Tyr	UGC	Cys	C
		UUA	Leu	UCA	Ser	UAA	STOP	UGA	STOP	A
		UUG	Leu	UCG	Ser	UAG	STOP	UGG	Try	G
C	CUU	Leu	CCU	Pro	CAU	His	CGU	Arg	U	
	CUC	Leu	CCC	Pro	CAC	His	CGC	Arg	C	
	CUA	Leu	CCA	Pro	CAA	Gln	CGA	Arg	A	
A	CUG	Leu	CCG	Pro	CAG	Gln	CGG	Arg	G	
	AUU	Iso	ACU	Thr	AAU	Asn	AGU	Ser	U	
	AUC	Iso	ACC	Thr	AAC	Asn	AGC	Ser	C	
	AUA	Iso	ACA	Thr	AAA	Lys	AGA	Arg	A	
G	AUG	Met	ACG	Thr	AAG	Lys	AGG	Arg	G	
	GUU	Val	GCU	Ala	GAU	Asp	GGU	Gly	U	
	GUC	Val	GCC	Ala	GAC	Asp	GGC	Gly	C	
	GUA	Val	GCA	Ala	GAA	Glu	GGA	Gly	A	
		GUG	Val	GCG	Ala	GAG	Glu	GGG	Gly	G

Actividad en grupos de 3: posibles efectos fenotípicos tras diferentes mutaciones puntuales

Secuencia de DNA original:

ATGCCAGGCGGCGAGAGCTTCTAATTGGCTTATAG

Secuencia de DNA editado:

ATGCCAGGCGGCGAGAGCTGGCTAATTGGCTTATAG

Descripción de la mutación:

Mutación puntual de cambio de sentido, de una T por una G (transversión) en el 7º codón, 2º posición

Secuencia de la proteína: cambio de Leu a Trp

Inicial: Met_Pro_Gly_Gly_Glu_ser_Leu_Leu_Ile_Gly_Leu

Mutada: Met_Pro_Gly_Gly_Glu_ser_Trp_Leu_Ile_Gly_Leu

Efecto a nivel celular de la proteína:

El cambio de aminoácido ha modificado la secuencia de aminoácidos, por lo que la proteína puede afectar a la diferenciación de los condroblastos.

Efecto a nivel fenotípico:

El individuo padecerá acondroplasia, por lo que se trata de una mutación perjudicial

Simulación solución

4 posibilidades:

1. Cambio de nucleótido, nuevo triplete codifique a otro Aa diferente, por lo tanto la proteína sintetizada será diferente.
El individuo padecerá acondroplasia → Mutación perjudicial
2. Cambio de nucleótido, nuevo triplete codifica al mismo Aa
El individuo no padecerá acondroplasia → Mutación silenciosa
3. Cambio de nucleótido (nuevo triplete) /adición o deleción (nuevos tripletes a partir de ese punto). Mutación en el codón de terminación (proteína mas larga).
El individuo padecerá deformaciones severas no compatibles con la vida → Mutación perjudicial
4. Cambio de nucleótido (nuevo triplete) /adición o deleción (nuevos tripletes a partir de ese punto). Mutación crea un codón de terminación antes del lugar apropiado (proteína más corta).
El individuo padecerá deformaciones severas no compatibles con la vida → Mutación perjudicial

Existe otra posibilidad de que la mutación afecte al codón de inicio, por tanto, no se dará la síntesis de la proteína.

Clasificación de mutaciones

CRITERIO	TIPOS DE MUTACIONES
CÉLULAS AFECTADAS	Somáticas (no se transmiten a la descendencia)
	Germinal (se transmiten a la descendencia)
CAUSAS	Naturales o espontáneas
	Inducidas por agentes mutagénicos
EFFECTOS	Beneficiosas
	Perjudiciales (letales, subletales y patológicas)
	Neutras
TIPO DE EXPRESIÓN GENÉTICA	Dominantes (respecto al alelo normal no mutado)
	Recesivas (respecto al alelo normal no mutado)
ALTERACIONES GENÉTICAS	Génicas (afectan a la secuencia de nucleótidos de un gen (ADN))
	Cromosómicas (alteración de la estructura de los cromosomas)
	Genómicas (alteración numérica de cromosomas)

Mutaciones cromosómicas

Causa: rotura espontánea de los cromosomas, que a veces, se incrementa por las condiciones ambientales, agentes mutagénicos o por determinados genes, como los transposones (regiones del ADN que pueden desplazarse de un cromosoma a otro, o cambiar de sitio dentro de un cromosoma)

1. ALTERACIONES EN EL ORDEN DE LOS GENES (disposición lineal de los cromosomas)

INVERSIONES	TRANSLOCACIONES	
<p>Son segmentos cromosómicos que han girado 180°, por lo que su secuencia génica queda invertida con respecto a la del resto del cromosoma. Son pericéntricas si el fragmento invertido incluye el centrómero, y paracéntricas en caso contrario.</p>	<p>Es el cambio de localización de un segmento cromosómico. La translocación puede ser recíproca con intercambio entre dos cromosomas no homólogos, o no recíproca o transposición cuando no se produce intercambio.</p>	

Mutaciones cromosómicas

2. ALTERACIONES POR LA EXISTENCIA DE UN NÚMERO INCORRECTO DE GENES

DELECCIONES O DEFICIENCIAS

a b c d e f g h i j

Delección a b f g h i j

Deficiencia c d e f g h i j

Es **delección** cuando falta un segmento cromosómico, y **deficiencia** si el segmento que falta está en el extremo del cromosoma.

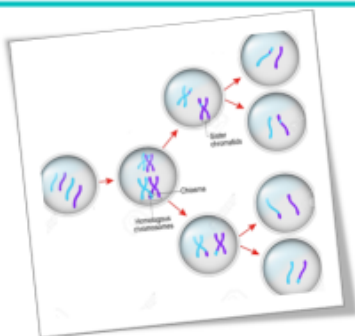
DUPLICACIONES O REPETICIONES

a b c d e f g h i j

a b c d e f d e f g h i j

Aparece un segmento cromosómico más de una vez, en el mismo cromosoma o en otro.

Mutaciones genómicas



Causa: segregación/ separación anómala de cromosomas o cromátidas en la meiosis

TIPOS	CLASES
Euploidías	Monoploidia
	Poliploidia
Aneuploidías	Nulisomias: $(2n-2)$ cromosomas
	Monosomias: $(2n-1)$ cromosomas
	Trisomias: $(2n+1)$ cromosomas
	Tetrasomias: $(2n+2)$ cromosomas

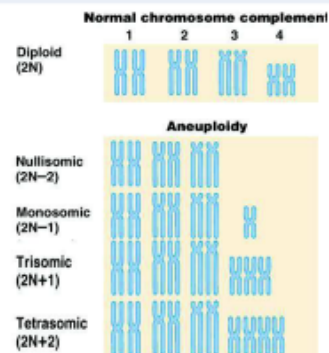
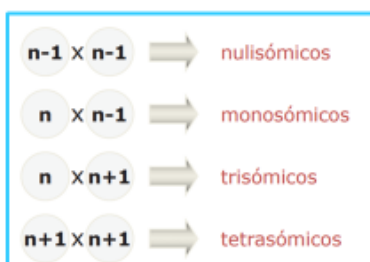
Mutaciones genómicas

TIPOS	CLASES	CARACTERÍSTICAS
Euploidías (alteraciones en el Nº normal de dotaciones cromosómicas o juegos cromosómicos)	Monoploidia	Una sola dotación cromosómica, <u>un solo cromosoma de cada par</u> (n) En la naturaleza raro: algunos vegetales
	Poliploidia	Más de dos juegos cromosómicos. Pueden ser: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Triploidías (3n) ▪ Tetraploidías (4n) ▪ Hexaploidías (6n) Mas frecuentes en vegetales, donde son más grandes los frutos, flores... (colchicina) <ul style="list-style-type: none"> ❖ Autopoliploidías (todas las dotaciones cromosómicas pertenecen a la misma especie) ❖ Alopoliploidías (hibridación de dos especies diferentes)



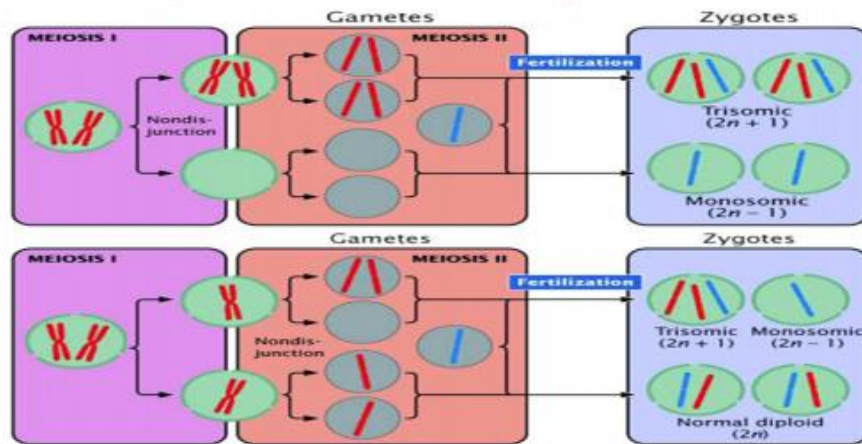
Mutaciones genómicas

TIPOS	CLASES	CARACTERÍSTICAS
Aneuploidías (falta o sobra un cromosoma)	Nulisomías: (2n-2) cromosomas	Falta una pareja cromosómica → Efectos letales
	Monosomías: (2n-1) cromosomas	Falta un cromosoma de una determinada pareja
	Trisomías: (2n+1) cromosomas	Un cromosoma se encuentra por triplicado
	Tetrasomías: (2n+2) cromosomas	Existen 4 ejemplares de un cromosoma determinado



Mutaciones genómicas

Origen de aneuploidías por no disyunción meiótica (separación de ambos miembros de un par de cromosomas homólogos/cromátidas hermanas)



Mutaciones genómicas

TIPOS	CLASES	CARACTERÍSTICAS
Aneuploidías (falta o sobra un cromosoma)	Nulisomías: (2n-2) cromosomas	Falta una pareja cromosómica → Efectos letales
	Monosomías: (2n-1) cromosomas	Falta un cromosoma de una determinada pareja
	Trisomías: (2n+1) cromosomas	Un cromosoma se encuentra por triplicado
	Tetrasomías: (2n+2) cromosomas	Existen 4 ejemplares de un cromosoma determinado



Trisomía cromosoma 21
Síndrome de Down



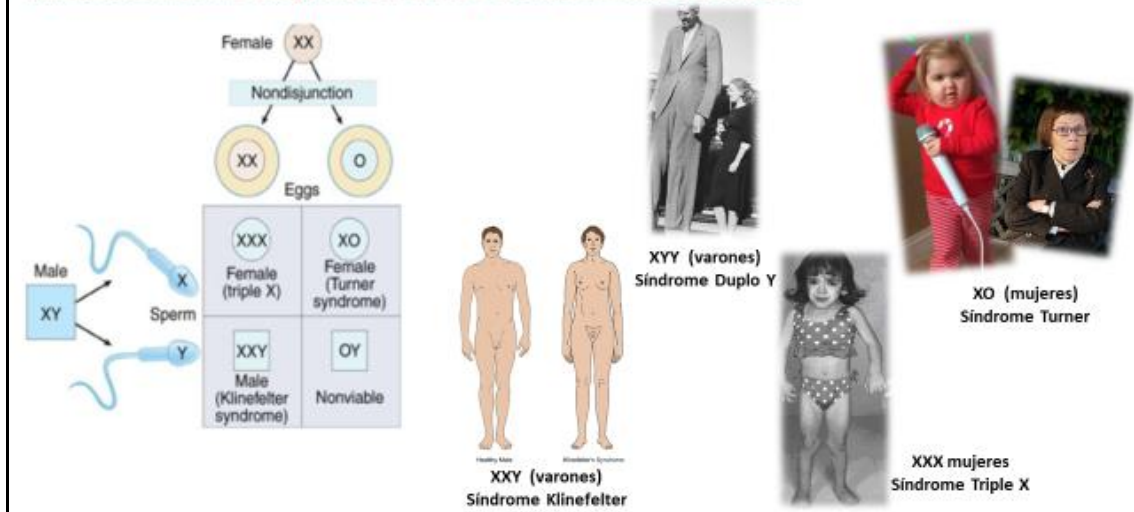
Trisomía cromosoma 18
Síndrome Edwards



Trisomía cromosoma 13
Síndrome Patau

Mutaciones genómicas

Alteraciones no disyunción en los cromosomas sexuales:



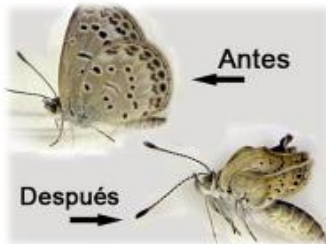
Agentes mutagénicos

Factores que aumentan la frecuencia de mutación espontánea de una especie. Todos ellos actúan dañando el ADN. Se clasifican en tres grupos: **físicos, químicos y biológicos**

GRUPOS	TIPOS	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Físicos	Radiaciones ionizantes	Son radiaciones electromagnéticas de longitud de onda muy corta y por tanto muy energéticas, lo cual provoca la pérdida de electrones en algunos átomos del ADN que quedan en forma de iones muy reactivos	Rayos X Rayos gamma Emisiones de partículas alfa y beta liberadas en las explosiones nucleares
	Radiaciones no ionizantes	No producen ionizaciones. Su acción consiste en provocar el paso de electrones a niveles energéticos más altos	Rayos UV (dímeros de timina)

Agentes mutagénicos

GRUPOS	TIPOS	EJEMPLOS
Físicos	Radiaciones ionizantes	Rayos X Rayos gamma Partículas alfa y beta
	Radiaciones no ionizantes	Rayos UV (dímeros de timina)



Agentes mutagénicos

Factores que aumentan la frecuencia de mutación espontánea de una especie. Todos ellos actúan dañando el ADN. Se clasifican en tres grupos: **físicos, químicos y biológicos**

GRUPO	TIPOS	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Químicos	Modificaciones de las bases nitrogenadas	Produce la desaminación de bases nitrogenadas y así, por ejemplo, se transforman la C en U. Cuando el ADN se replica se incorporan bases incorrectas, ya que U tiene como complementario A.	HNO ₂ (ácido nitroso)
		Añaden grupos alquilo (metilo, etilo...) con lo que se altera la replicación del ADN. Así por ejemplo, la G se transforma por alquilación en G-O-metilguanina, que se apareja con Ten lugar de con C.	Gas mostaza
	Sustitución de una base por otra sustancia análoga	Provoca un emparejamiento erróneo durante la replicación. Se emplean análogos de una base nitrogenada para fármacos antitumorales o antivíricos, ya que evitan una correcta replicación del ADN, impidiendo la reproducción del organismo.	5-bromouacilo en lugar de T Medicamento contra el VIH
	Inserción de ciertas moléculas en una cadena de ADN	Los colorantes se intercalan entre las bases nitrogenadas de una cadena de ADN, provocando la aparición de un exceso de nucleótidos en la hebra de nueva formación durante la replicación. A partir de ese punto, los tripletes de bases se alteran y el mensaje genético cambia.	Colorantes (naranja de acridina)

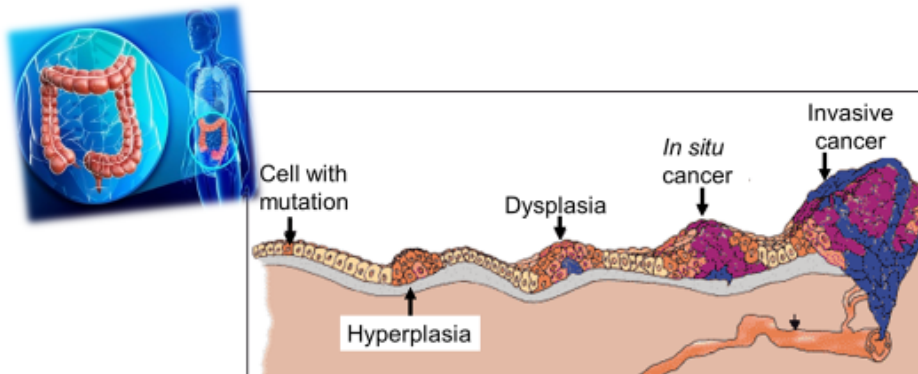
Agentes mutagénicos

Factores que aumentan la frecuencia de mutación espontánea de una especie. Todos ellos actúan dañando el ADN. Se clasifican en tres grupos: **físicos, químicos y biológicos**

GRUPOS	TIPOS	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Biológicos	Transposones	Fragmentos de ADN que pueden cambiar de posición, trasladándose a otro lugar distinto dentro del mismo cromosoma o incluso a otro cromosoma. Estos elementos móviles se han encontrado en todo tipo de organismos (levaduras, insectos, bacterias...) y pueden originar mutaciones. Se cree que los virus mutagénicos podrían realizar su acción al llevar en su genoma transposones tomados de una célula previamente infectada.	-
	Virus	Pueden producir cambios en la expresión de algunos genes	Papiloma Hepatitis B

Cáncer

El cáncer es una enfermedad que consiste en una multiplicación rápida de las células alteradas, las cuales forman un **tumor**. Si este está localizado, es decir, las células se mantienen juntas y crecen lentamente, recibe el nombre de tumor benigno. En cambio si crece rápidamente invadiendo y destruyendo los demás tejidos, se dice que el tumor es maligno y que la persona padece un cáncer.



Cáncer

El paso de una célula normal a célula cancerosa se produce por defectos en determinados genes que participan en la regulación de la división celular. Estos genes son:

PROTOONCOGENES

- Genes que codifican proteínas implicadas en los mecanismos de control y proliferación celular.
- La mutación de los protooncogenes, origina los **oncogenes**.

GENES SUPRESORES DE TUMORES

- Genes que codifican proteínas inhibidoras de la división celular.
- La mutación de estos genes estimula la **proliferación celular**.

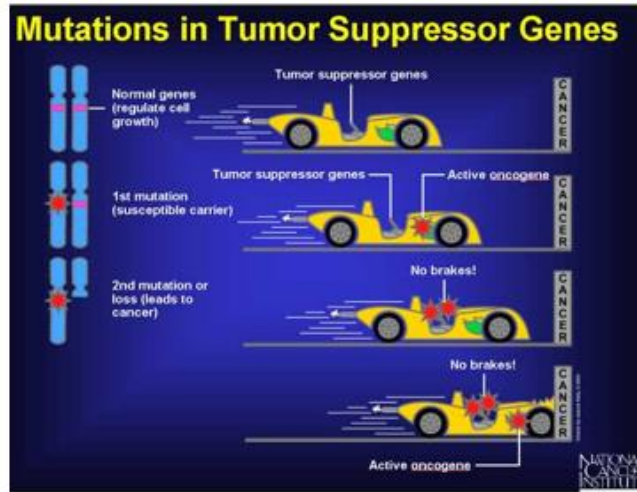
CARACTERÍSTICA	ONCOGENES	GENES SUPRESORES DE TUMORES
Alteración del ciclo celular	Por activación	Por inactivación
Expresión	Dominante (mutación de un alelo)	Recesiva (mutación de ambos alelos o mutación de uno con pérdida o reducción de la homocigocidad del segundo)
Origen de la mutación	Se origina en el tejido somático, no es hereditaria	Presente en células germinales (hereditarias) o en células somáticas

* Es probable que para que se desarrolle un tumor sea necesarias mutaciones en ambos tipos de genes

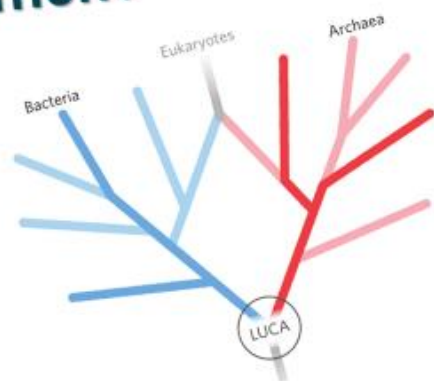
Cáncer



Cáncer



¿Cómo pueden saber los científicos que venimos de un ancestro común?



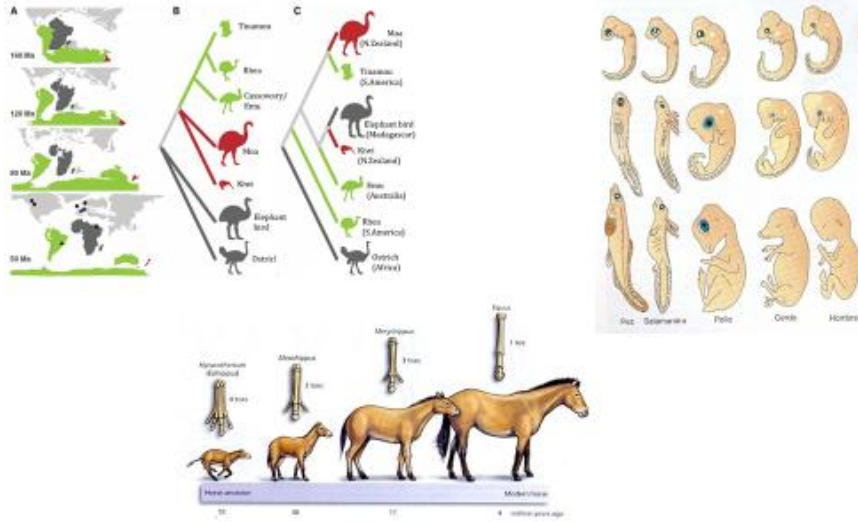
Pruebas de la evolución

Organismo	Hombre	Mono	Perro	Conejo	Canguro	Pato	Serpiente de cascabel	Tortuga	Atún	Pala	Neurospora	Candida	Levedura
Hombre	0												
Mono	1	0											
Cerdo, bovino, oveja	10	9	0										
Caballo	12	11	3	0									
Perro	11	10	3	6	0								
Conejo	9	8	4	6	5	0							
Canguro	10	11	8	7	7	8	0						
Pato, guajolote	13	12	9	11	10	8	12	0					
Pala	11	10	8	10	8	6	10	3	0				
Serpiente de cascabel	14	13	20	22	21	18	21	19	17	0			
Tortuga	15	14	9	11	9	9	11	8	7	22	0		
Atún	21	21	17	19	18	17	18	17	20	18	0		
Pala	31	30	27	29	25	26	28	27	31	28	30	0	
Neurospora	48	47	46	45	46	46	49	47	46	47	49	40	47
Candida	51	51	50	51	49	50	51	51	51	51	53	48	47
Levedura	45	45	45	48	45	45	46	46	46	47	49	47	47

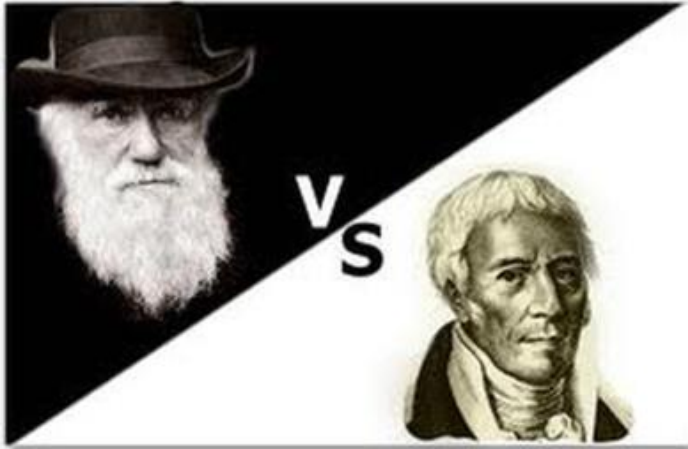
Diferencias entre las secuencias de aminoácidos del citocromo c de diferentes especies. Los números indican la cantidad de aminoácidos en que difieren dos especies.

gorila humano
 GTGCCCATCCAAAAGTCCAGGATGACACCAAAAACCCCTCATCAAGACAATTGTCCACGAG
chimpancé
 GTGCCCATCCAAAAGTCCAGGATGACACCAAAAACCCCTCATCAAGACAATTGTCCACGAG
humano gorila
 ATCAATGACATTTCACACACGCAGTCAGTCTCTCCAAACAGAAAGATCAACCGGTTTGAC
chimpancé gorila
 ATCAATGACATTTCACACACGCAGTCAGTCTCTCCAAACAGAAAGATCAACCGGTTTGAC
gorila humano
 TTCATTCTGGGCTCCACCCGATCCTGACCTTATCCAAAGATGGACCAACACTGGCACTC
chimpancé gorila
 TTCATTCTGGGCTCCACCCGATCCTGACCTTATCCAAAGATGGACCAACACTGGCACTC
humano chimpancé
 TACCAACAGATCCTCAACAGTATGCTTCAGAAAGGTGATCCAAATCCCAACGACCTG
chimpancé gorila
 TACCAACAGATCCTCAACAGTATGCTTCAGAAAGGTGATCCAAATCCCAACGACCTG
humano chimpancé
 GAGAACTCCGGGATTCTTCAAGGTGCTGGCTCTCTAAGAGCTGCCACTGCGCTTG
gorila
 GAGAACTCCGGGATTCTTCAAGGTGCTGGCTCTCTAAGAGCTGCCACTGCGCTTG

Pruebas de la evolución



Lamarckianos Vs Darwinianos



LAMARCK VS DARWIN

LAMARCK:

- Los cambios ambientales originan nuevas necesidades
- Éstas determinan el uso o desuso de unos u otros órganos.
- Tales órganos se desarrollan o se atrofian, respectivamente.
- Los caracteres así adquiridos son hereditarios.



DARWIN:

- Los individuos presentan variaciones.
- La escasez del alimento les obliga a luchar por la existencia.
- Aquellos individuos dotados de variaciones ventajosas tienen más probabilidades de alcanzar el estado adulto, reproducirse y legar dichas variaciones a su descendencia.



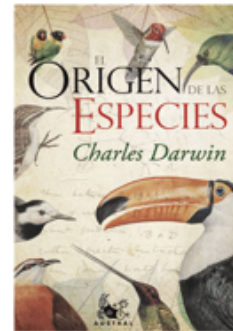
Neodarwinismo

Darwin basaba el proceso evolutivo en tres factores:

El excesivo número de descendientes.

La variabilidad de la descendencia. Murió sin saber el origen de esta variabilidad.

La selección natural.



TEORIA SINTÉTICA O NEODARWINISMO

Confirma la teoría de la selección natural de Darwin tras nuevos conocimientos de genética. Con ello se explica el origen de la variabilidad genética:

- **Reproducción asexual:** exclusivamente a mutaciones.
- **Reproducción sexual:** mutaciones y recombinación genética de los cromosomas homólogos en la meiosis.

La mutación es desde un punto de vista evolutivo, mucho más importante que la recombinación, ya que puede dar lugar a nuevos genes. Mientras que la recombinación genética simplemente origina agrupaciones distintas de genes.

Experto en clonación
Experto en edición del genoma
Experto en secuenciación del genoma



Anexo 3: Guion para la simulación de mutaciones puntuales

Descripción

En grupos de 3 halla todos los posibles efectos tras sufrir una mutación génica en una secuencia de DNA determinada. Sigue el esquema para completar 4 posibilidades a través de la aplicación de *Lab Concord (DNA mutations)* en un caso en particular de acondroplasia. Ayúdate en el siguiente esquema del código genético.

Segunda Letra

		U		C		A		G		
Primera Letra	U	UUU	Phe	UCU	Ser	UAU	Tyr	UGU	Cys	U
		UUC	Phe	UCC	Ser	UAC	Tyr	UGC	Cys	C
		UUA	Leu	UCA	Ser	UAA	STOP	UGA	STOP	A
		UUG	Leu	UCG	Ser	UAG	STOP	UGG	Try	G
	C	CUU	Leu	CCU	Pro	CAU	His	CGU	Arg	U
		CUC	Leu	CCC	Pro	CAC	His	CGC	Arg	C
		CUA	Leu	CCA	Pro	CAA	Gln	CGA	Arg	A
		CUG	Leu	CCG	Pro	CAG	Gln	CGG	Arg	G
	A	AUU	Iso	ACU	Thr	AAU	Asn	AGU	Ser	U
		AUC	Iso	ACC	Thr	AAC	Asn	AGC	Ser	C
		AUA	Iso	ACA	Thr	AAA	Lys	AGA	Arg	A
		AUG	Met	ACG	Thr	AAG	Lys	AGG	Arg	G
	G	GUU	Val	GCU	Ala	GAU	Asp	GGU	Gly	U
		GUC	Val	GCC	Ala	GAC	Asp	GGC	Gly	C
		GUA	Val	GCA	Ala	GAA	Glu	GGA	Gly	A
		GUG	Val	GCG	Ala	GAG	Glu	GGG	Gly	G

©BIOINNOVA
innovabiologia.com

Desarrollo

Después de generar la mutación y observar el cambio en la proteína, observa el efecto que tiene la mutación a nivel celular y fenotípico completando la tabla de la siguiente hoja.

Para ello, imaginemos que la proteína de la simulación es la encargada de la transformación de condroblastos (cartílago) a osteoblastos (hueso). En el caso de la acondroplasia, se produce un crecimiento de cartílago continuado, sin producir hueso, es decir, no se produce la transformación de condroblastos a osteoblastos.

Tienes que tener en cuenta que si se produce una mutación en la cual cambia algún aminoácido respecto a la secuencia de DNA original, el individuo padecerá acondroplasia. En cambio, si el producto final es una proteína más larga, o más corta que la inicial, dará lugar a deformidades severas y no compatibles con la vida.

Tabla para completar

Secuencia de DNA original: ATGCCAGGCGGCGAGAGCTTGCTAATTGGCTTATAG
Secuencia de DNA editado:
Descripción de la mutación: Tipo de mutación: Número de codón: Posición:
Secuencia de los aminoácidos de la proteína: Inicial: Final:
Efecto a nivel celular de la proteína:
Efecto a nivel fenotípico:

Anexo 4: Prueba de compatibilidad

Rodea la respuesta que creas que es la más acertada. Preguntas sustraídas de un trabajo investigativo sobre hipótesis evolutivas (Jiménez & Muñoz, 2015).

1. ¿Por qué las aves tienen alas?

- a) Porque necesitan volar para adaptarse al medio.
- b) Por mutaciones o cambios heredables.
- c) Por la evolución.
- d) Porque siempre las han tenido.

2. Existen evidencias fósiles que indican que las jirafas primitivas eran animales de cuello corto y patas cortas. Sin embargo, las jirafas actuales tienen cuello largo y patas largas ¿qué crees que ocurrió entonces?

- a) Las jirafas tenían necesidad de acceder a zonas más altas para comer.
- b) Se ha producido una mutación y/o éxito diferencial.
- c) La especie ha evolucionado.
- d) Se produjo un cruzamiento entre diferentes especies.

3. Un cultivo de maíz ha sido recientemente atacado por una plaga de insectos. Los agricultores no entienden el motivo de estas plagas, pues habían fumigado los campos como cada año. Todo parece indicar que los plaguicidas ya no tienen efecto. ¿Cómo explicarías este fenómeno?

- a) Los insectos se han adaptado como respuesta al insecticida.
- b) Los insectos han mutado.
- c) Los insectos han ido evolucionando.
- d) Los agricultores no hicieron correctamente el proceso de fumigación.

4. Si realizásemos un experimento que consistiera en cortar la cola a unos ratones durante varias generaciones, y ver qué ocurre en la descendencia ¿cómo crees que nacerían estos al cabo de 40 generaciones?

- a) Sin cola.
- b) Con cola.
- c) Con cola, pero no la podrían mover.
- d) Nacerían algunos con cola y otros sin cola.

Cuadro final de las respuestas

1	
2	
3	
4	

DARWINIANOS

Evolución por el mecanismo de selección natural

1. Los antibióticos se usan para combatir las enfermedades de origen bacteriano. Cuando las bacterias se enfrentan a un antibiótico, la mayoría mueren enseguida. Sin embargo, algunas tienen mutaciones que las hacen menos débiles a ese antibiótico concreto. Las bacterias supervivientes se reproducen formando la siguiente generación que tienen cierto grado de resistencia antibiótica. Al mismo tiempo, surgen nuevas mutaciones de las cuales algunas pueden añadir más resistencia a la bacteria portadora del gen mutante. Si una nueva mutación reduce la susceptibilidad al antibiótico, los individuos que la porten tienen más probabilidad de sobrevivir al antibiótico y reproducirse. Con tiempo y exposición al antibiótico suficiente, acaba apareciendo una población de bacterias resistentes al antibiótico. Esta nueva población de bacterias resistentes está adaptada óptimamente al entorno en el que había antibiótico.
2. En Inglaterra hay dos tipos de especies de polillas moteadas: las de gris claro y la de gris oscuro. Las de gris claro solían ser las más comunes, pero al cabo de unos años, al mismo tiempo que el carbón se convertía en el combustible para la industria eléctrica frecuente en Inglaterra, se observó que el porcentaje de estas polillas de color gris claro había disminuido considerablemente. En este caso, el cambio del medio ambiente originó que aquellas polillas de color gris oscuro tuvieran más posibilidades de sobrevivir, y por lo tanto, más posibilidades de reproducirse.
3. Existen escarabajos verdes y marrones debido a una diferente base genética. En el ambiente donde viven, los pájaros tienden a comerse los escarabajos verdes, lo que dificulta la supervivencia y la reproducción respecto a los marrones. Este carácter ventajoso de los escarabajos marrones, les permite tener más descendientes, y por lo tanto haber un mayor número en la población. Si esta tendencia se mantiene en el mismo ambiente, todos los escarabajos de esa población serán marrones.

Basados en el artículo: (Mutt, 2013)

LAMARCKIANOS

Evolución por herencia de los caracteres adquiridos

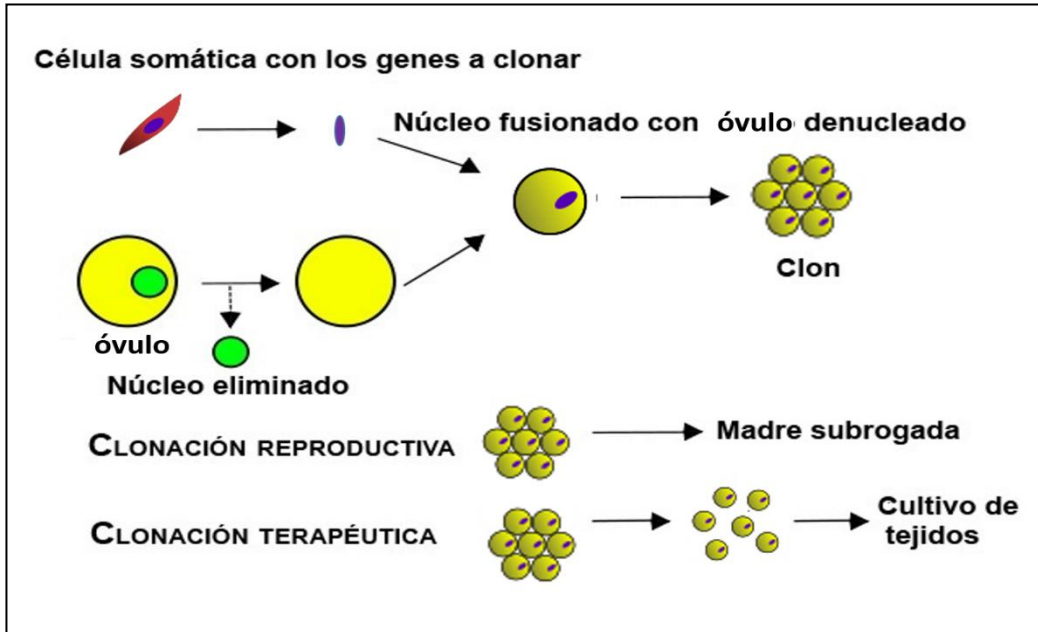
1. Cuando las plantas de rábano son atacadas por las orugas, producen productos químicos desagradables y crecen espinas protectoras. La descendencia de los rábanos dañados por orugas también produce estas defensas, incluso cuando viven en un ambiente libre de orugas.

2. Las pulgas de agua femeninas responden a las señales químicas de sus depredadores mediante el crecimiento de cascos protectores. La descendencia de las pulgas de agua con cascos también nace con cascos, incluso en ausencia de señales de depredadores. Este efecto continúa en la próxima generación, es decir, nacen nuevas pulgas con el casco protector.

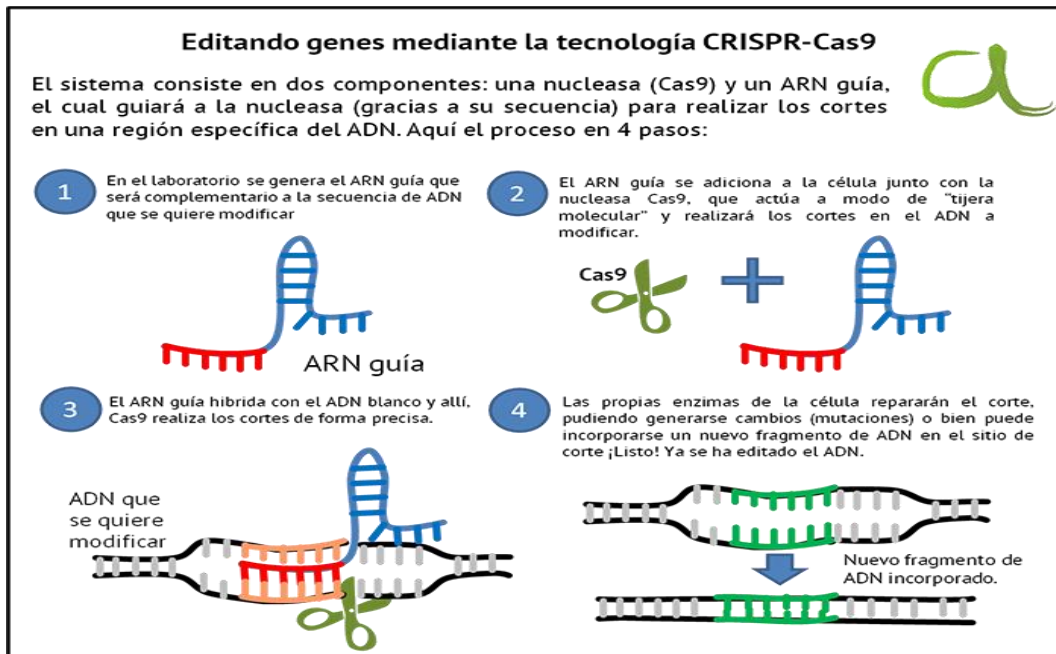
Basados en la página web [Learn Genetics](#).

Anexo 6: Material complementario para trabajo cooperativo para el estudio de nuevas tecnologías

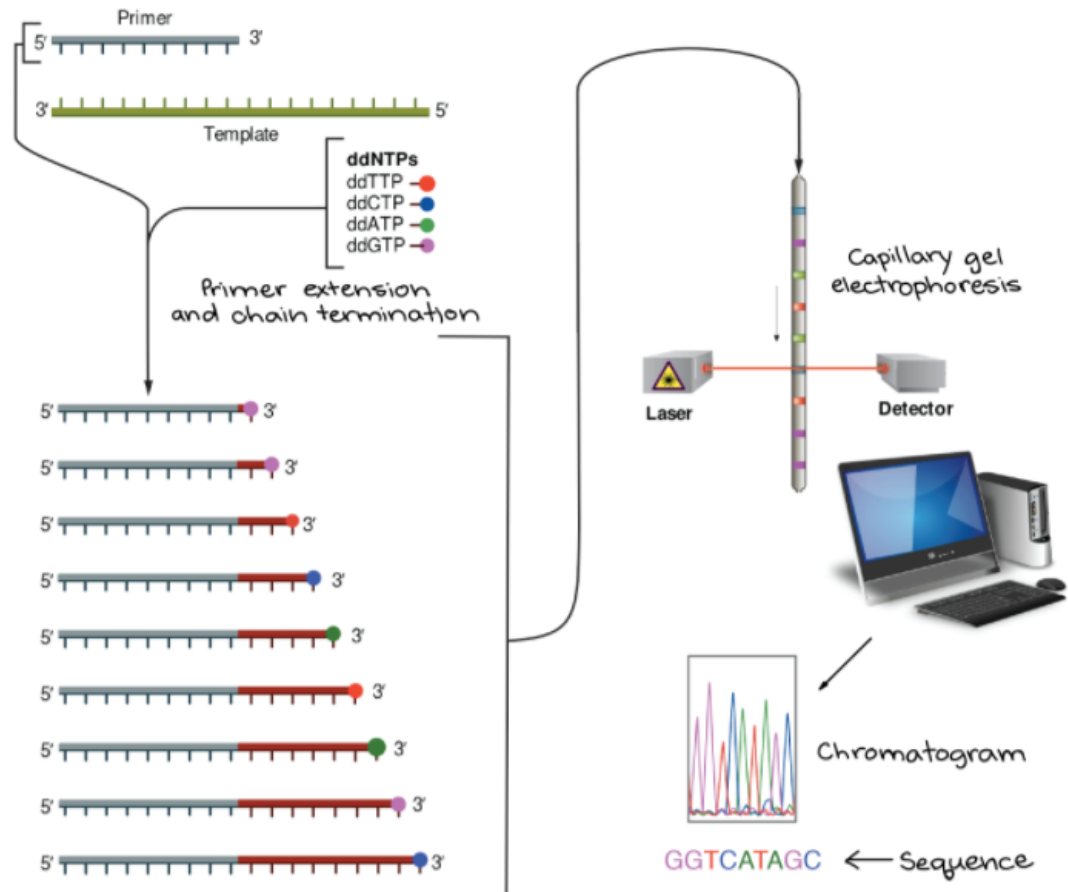
Artículo: Científicos chinos crean los primeros monos clonados con la técnica de la oveja 'Dolly'. Imagen (Wikipedia, 2017).



Artículo: Una nueva técnica de edición genética corrige enfermedades en células humanas. Imagen: (Acerca Ciencia, 2015).



Artículo: El cerebro es un mosaico de mutaciones (Imagen: KhanAcademy, 2018).



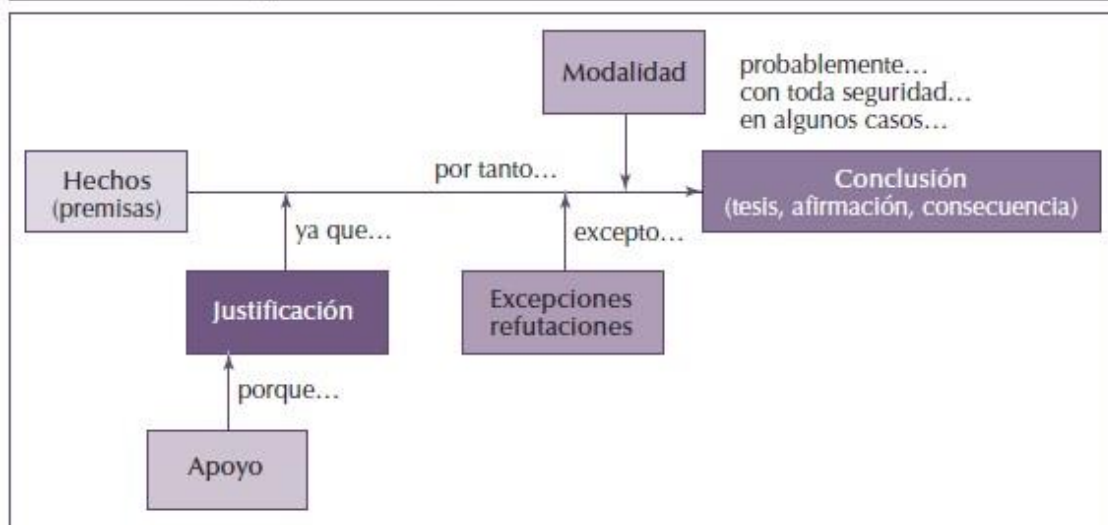
Ejemplo: acrodoplasia

- Mutación autosómica dominante en el gen *FGFR3*.
- En la mayor parte de las veces, mutación de novo.
- En 98% casos, mutación puntual de G a A, produce una sustitución de glicina a arginina.

Anexo 7: Construcción de argumentos para el debate

Código:

Grafica 1. El modelo argumentativo de Toulmin.



Temas para el debate: clonación y secuenciación y edición del genoma.

Partiendo del modelo argumentativo de Toulmin, construye argumentos siguiendo la siguiente plantilla:

Hechos	
Justificación	
Excepciones	
Modalidad	
Conclusión	

*Deberás de tener en cuenta los posibles beneficios/ventajas y riesgos/inconvenientes a tu respuesta. También debe verse reflejado si existe otra razón por la cual tu justificación es cierta, y bajo que condiciones esa justificación es verdadera.

Por último: **¿ha cambiado tu opinión respecto a tu pensamiento inicial?**. De ser afirmativo, explica en qué aspectos ha cambiado.

Anexo 8: Resultados análisis test final

Tabla 16. Porcentaje de alumnos de 2° de Bachillerato que identifica la presencia de elementos en cada tipo celular

2° de Bachillerato	Información hereditaria	Cromosoma/s	Cromosomas sexuales	Genes	ADN
Sangre	100,0	100,0	83,0	100,0	100,0
Óvulo	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Músculo	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Hueso	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Prótesis de cadera	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pétalos de una flor	83,3	77,8	61,1	77,8	83,3
Bacteria	77,8	77,8	61,1	77,8	100,0
Virus	33,3	33,3	0,0	33,3	61,1

Tabla 17. Porcentaje de alumnos de 2° de Bachillerato en el test inicial y final a las cuatro opciones de las preguntas 3 sobre clonación de la Oveja Dolly y la 4 sobre el pez Mendaka

Preguntas 2°Bach	Antes				Después				p
	a	b	c	d	a	b	c	d	
3_clonación Dolly	61,1	38,9	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	0,008
4-pez Mendaka	0,0	5,6	88,9	5,6	0,0	0,0	100	0,0	0,151

Tabla 18. Porcentaje de alumnos de 2° de Bachillerato que asocia cada ejemplo con características influidas por factores genéticos, ambientales o una modulación entre ambos en el test inicial y final

Pregunta 5	Genéticos		Ambientales		Ambos	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Grupo sanguíneo	94,4	100,0	5,6	0,0	0,0	0,0
Estatura	66,7	55,6	0,0	0,0	33,3	44,4
Cicatrices	5,6	5,6	66,7	66,7	27,8	27,8
Lunares	16,7	11,1	16,7	22,2	66,7	66,7
Acento al hablar	0,0	0,0	83,3	94,4	16,7	5,6
Enfermedad cardiovascular	44,4	44,4	0,0	0,0	55,6	55,6