Ápice. Revista de Educación Científica, 10(2), 2026 DOI: https://doi.org/10.17979/arec.2026.10.2.13983
Sección. Investigación en educación científica ISSN: 2531-016X
BY-SA

Enseñanza de la expresión genética mediante indagación científica: la intolerancia a la lactosa como contexto

Adolfo Carrasco-Sánchez, Marina Reinaldos-Segura y Gabriel Enrique Ayuso-Fernández

Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Facultad de Educación. Universidad de Murcia. Murcia, España.

[Recibido: 14 julio 2026, Revisado: 24 julio 2026, Aceptado: 18 agosto 2026]

Resumen: Este trabajo presenta el diseño, implementación y evaluación de una propuesta didáctica basada en la indagación científica para mejorar la comprensión de la expresión génica en estudiantes de 1.º de Bachillerato. Tomando como contexto la intolerancia a la lactosa, se estructuró una secuencia de indagación guiada en siete fases. Mediante un diseño pretest-postest aplicado a 20 estudiantes, se detectaron concepciones alternativas relevantes y se evaluó el cambio conceptual tras la intervención. Los resultados muestran mejoras significativas en la comprensión de la expresión génica diferencial, la localización del material genético y el papel de las mutaciones. Asimismo, la totalidad del alumnado alcanzó el nivel experto en las fases de diseño experimental y recogida de datos. La propuesta fue valorada positivamente por los estudiantes, que destacaron el aprendizaje práctico y la guía docente. Estos resultados apoyan la eficacia de la indagación científica contextualizada para superar dificultades de aprendizaje en genética y mejorar la alfabetización científica.

Palabras clave: indagación científica; expresión genética; ciencia en contexto; intolerancia a la lactosa.

Teaching Gene Expression through Scientific Inquiry: Lactose Intolerance as Context

Abstract: This paper reports on the design, implementation, and evaluation of a didactic proposal based on scientific inquiry to improve understanding of gene expression among first-year senior cycle secondary school students. Taking lactose intolerance as context, the proposal consisted of a guided inquiry sequence structured in seven phases. The research used a pre-test/post-test methodology applied to 20 students to detect the most prevalent conceptions prior to the intervention and assess conceptual change subsequently. The results show significant improvement in understanding of differential gene expression, localization of genetic material, and the role of mutations. Likewise, all of the students achieved expert level in the experimental design and data collection phases. The proposal was evaluated positively by the students, particularly the practical component and the teaching guide. These results corroborate the effectiveness of contextualized scientific inquiry to overcome learning difficulties in genetics and improve scientific literacy.

Keywords: scientific inquiry; gene expression; science in context; lactose intolerance.

Para citar el artículo. Carrasco-Sánchez, A., Reinaldos-Segura, M. y Ayuso-Fernández, G. E. (2026). Enseñanza de la expresión genética mediante indagación científica: la intolerancia a la lactosa como contexto. *Ápice. Revista de Educación Científica*, 10(2), 2206. DOI: https://doi.org/10.17979/arec.2026.10.2.13983
Contacto. adolfo.carrascos@um.es, marina.reinaldoss@um.es, ayuso@um.es

1. Introducción

La genética molecular ocupa un lugar central en la biología contemporánea y su relevancia social ha crecido en las últimas décadas, especialmente en medicina personalizada, biotecnología y edición genómica. Sin embargo, esta relevancia contrasta con las dificultades del alumnado de Educación Secundaria para comprender sus conceptos, entre los que la expresión génica es uno de los más complejos y abstractos (Caballero, 2008; Duncan y Reiser, 2007).

La enseñanza de la genética en España presenta una inserción curricular tardía y fragmentada. Bajo la LOMLOE (2020), los contenidos sobre expresión génica no se abordan con profundidad hasta 2.º de Bachillerato y solo en la optativa de Biología. Como consecuencia, el alumnado desarrolla concepciones alternativas arraigadas y escasa base para integrar los mecanismos moleculares implicados (Ageitos et al., 2017; Ruiz-González et al., 2017).

Por otra parte, diversas investigaciones en Didáctica de las Ciencias han mostrado la eficacia de las metodologías activas basadas en la indagación científica para superar estas dificultades de aprendizaje (Aguilera et al., 2018; Couso et al., 2020). Asimismo, la enseñanza de las ciencias en contexto relaciona los contenidos científicos con situaciones reales y cercanas al alumnado, favoreciendo un aprendizaje significativo (Muñoz-Campos et al., 2020).

En este trabajo se presenta el diseño, implementación y evaluación de una propuesta didáctica basada en la indagación guiada para abordar la expresión génica en un grupo de 1.º de Bachillerato. La propuesta responde a tres problemas de investigación interrelacionados: identificación de concepciones alternativas del alumnado, diseño de una secuencia didáctica coherente con el enfoque indagativo y evaluación de sus efectos sobre la comprensión conceptual y las competencias de indagación científica.

2. Marco teórico

2.1 Las prácticas científicas en la enseñanza de la genética

La educación científica defiende un modelo en el que el alumnado construye conocimiento a través de prácticas auténticas. Entre estas, la indagación, la modelización y la argumentación científica se consideran ejes del aprendizaje de las ciencias (Couso et al., 2020). Su incorporación al aula favorece la comprensión conceptual y el desarrollo de competencias transversales como el pensamiento crítico y la toma de decisiones.

La genética, y en particular la expresión génica, constituye un dominio idóneo para trabajar estas prácticas, dado que sus procesos moleculares (transcripción, traducción, regulación génica) son abstractos, no observables directamente y requieren modelos explicativos que articulen distintos niveles de organización biológica (Duncan y Reiser, 2007; Marbach-Ad et al., 2008). Entre estas prácticas, la indagación constituye el eje central de este trabajo; por ello, a continuación se exponen las características de su aplicación en aulas de ESO y Bachillerato.

2.2 Indagación científica: fundamentos y niveles

La indagación científica ha demostrado ser una de las metodologías más efectivas para la enseñanza de las ciencias experimentales, con evidencias convergentes a nivel internacional (Aguilera et al., 2018). Esta práctica supera la transmisión unidireccional de conceptos al situar al alumnado ante problemas reales, en los que debe formular hipótesis, diseñar procedimientos, recoger datos y elaborar conclusiones argumentadas (Ferrés-Gurt, 2017).

Se distinguen cuatro niveles de indagación según el grado de autonomía del alumnado: confirmación, estructurada, guiada y abierta (Aguilera et al., 2018). La indagación guiada,

caracterizada por el planteamiento de una pregunta investigable por parte del docente mientras el alumnado diseña el procedimiento para responderla, puede constituir una estrategia especialmente adecuada para favorecer la comprensión conceptual y el desarrollo de competencias científicas. Su implementación en el aula se articula habitualmente en cuatro fases generales: formulación de preguntas investigables, búsqueda de información y exploración de ideas, elaboración de explicaciones basadas en pruebas y reflexión sobre el proceso desarrollado y los resultados obtenidos (Couso et al., 2020; Riga et al., 2017).

2.3 La enseñanza de las ciencias en contexto

La enseñanza de las ciencias en contexto surge como una respuesta a las dificultades que presenta el alumnado para comprender los conceptos científicos, influenciadas por sus ideas previas y por la dificultad de relacionar los niveles macroscópico y submicroscópico. Este enfoque propone vincular los contenidos científicos con situaciones reales y cercanas al estudiante, favoreciendo un aprendizaje significativo. Además, cuenta con un sólido respaldo epistemológico, psicológico y pedagógico, al situar el aprendizaje científico en contextos reales y significativos para el alumnado (Muñoz-Campos, 2021). La intolerancia a la lactosa constituye un contexto adecuado para trabajar la expresión génica, al estar vinculada a la regulación del gen LCT y conectar con experiencias cotidianas del alumnado (Lewis y Leach, 2006).

2.4 Concepciones alternativas del alumnado sobre la expresión génica

Numerosas investigaciones han documentado la persistencia de concepciones alternativas en genética y expresión génica. Así, se ha identificado que muchos estudiantes inician el estudio de la herencia sin esquemas conceptuales adecuados para relacionar célula, cromosomas, genes, ADN y proteínas; la creencia de que solo las células sexuales contienen información hereditaria; la confusión entre gen, cromosoma y ADN; la escasa comprensión de la relación entre genes y proteínas; o no concebir que los genes puedan activarse o desactivarse según la necesidad celular (Ageitos et al., 2017; Caballero, 2008; Ruiz et al., 2017; Todd y Kenyon, 2016, entre otros). Estas dificultades se agravan por la abstracción de los procesos de transcripción y traducción, no observables directamente (Duncan y Reiser, 2007; Marbach-Ad et al., 2008).

2.5 La expresión génica en el currículo de Bachillerato

El análisis del currículo oficial establecido para la Educación Secundaria (Real Decreto 217/2022, 2022) revela que los contenidos de expresión génica se abordan de forma progresiva y tardía. En 4.º de ESO, la asignatura de Biología y Geología introduce la estructura del ADN, las etapas de la expresión génica y las mutaciones. Sin embargo, el estudio de los mecanismos moleculares (transcripción, traducción, regulación génica y sus aplicaciones biotecnológicas) no llega hasta 2.º de Bachillerato, en la asignatura optativa de Biología (Real Decreto 243/2022, 2022). Esta organización curricular dificulta la consolidación de una base conceptual adecuada y justifica el desarrollo de propuestas tempranas y contextualizadas.

3. Objetivos e hipótesis de investigación

La pregunta principal que guía este trabajo es: ¿cómo puede contribuir una propuesta de indagación científica contextualizada en la intolerancia a la lactosa al desarrollo del conocimiento sobre la expresión génica en estudiantes de 1.º de Bachillerato? Esta cuestión se concreta en tres objetivos:

1. Identificar las concepciones alternativas del alumnado sobre la expresión génica antes de la intervención.
2. Diseñar, implementar y evaluar una propuesta didáctica basada en la indagación científica contextualizada para mejorar la comprensión de la expresión génica.
3. Determinar los efectos de la propuesta sobre la comprensión de la expresión génica y el desarrollo de la capacidad de indagación científica.

En relación con estos objetivos, se plantean las siguientes hipótesis de trabajo:

Hipótesis 1: el alumnado de 4º de la ESO presenta concepciones alternativas y dificultades relevantes en la comprensión de la expresión génica, incluso tras haber trabajado los contenidos de genética en el aula. La expresión génica constituye uno de los conceptos más abstractos de la genética, al implicar procesos moleculares no observables directamente que dificultan establecer relaciones entre genotipo y fenotipo (Duncan y Reiser, 2007; Marbach-Ad et al., 2008).

Hipótesis 2: es posible diseñar, implementar y evaluar una propuesta didáctica coherente basada en la indagación y en el contexto de la intolerancia a la lactosa, para abordar el contenido de la expresión génica en Bachillerato. Esta hipótesis se apoya en evidencias que avalan la eficacia del enfoque indagativo (Aguilera et al., 2018; Couso et al., 2020; Riga et al., 2017). Además, la intolerancia a la lactosa constituye un contexto cercano para trabajar la expresión génica al conectar mecanismos moleculares con situaciones cotidianas (Lewis y Leach, 2006).

Hipótesis 3: la aplicación de una propuesta didáctica basada en la indagación mejora la comprensión de la expresión génica y el desarrollo de las competencias de indagación científica del alumnado. En este sentido, una actividad de indagación guiada y contextualizada debe fundamentarse en la idea de que el alumnado aprende con mayor eficacia los conceptos científicos cuando indaga sobre ellos (Rocard et al., 2007). Para ello, debe partir de una pregunta investigable relevante que estructure la secuencia de aprendizaje (Ferrés-Gurt, 2017).

4. Metodología

4.1 Contexto y participantes

La investigación se llevó a cabo con un grupo de 1.º de Bachillerato del itinerario de Ciencias de un centro público de Educación Secundaria. La muestra estuvo compuesta por 20 estudiantes. El grupo presentaba diversidad de niveles de rendimiento y alta motivación hacia la materia. Todos los participantes habían cursado previamente la asignatura de Biología y Geología en 4.º de ESO, donde abordaron contenidos básicos de genética.

4.2 Diseño de la investigación

Se adoptó un diseño cuasi-experimental de pretest-postest sin grupo de control, combinando metodologías cuantitativas y cualitativas. Este diseño, habitual en investigación educativa en contextos reales de aula, permite identificar cambios conceptuales tras la intervención, si bien debe interpretarse con cautela debido a la ausencia de grupo control y a la posible influencia de variables externas. Para minimizar estos riesgos, se redujo al mínimo el intervalo temporal entre ambas aplicaciones y se mantuvieron las condiciones de aplicación homogéneas.

Para el tratamiento de los datos cuantitativos se optó por estadística no paramétrica, adecuada a las características y tamaño de la muestra. Específicamente, se aplicó la prueba de

rangos con signo de Wilcoxon para muestras emparejadas con el fin de evaluar la existencia de diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento antes y después de la intervención. Asimismo, para determinar la magnitud del impacto y la significación práctica de dicha mejora, se calculó el tamaño del efecto mediante el estadístico d de Cohen. Todos los análisis cuantitativos se ejecutaron mediante el software estadístico Jamovi. De forma complementaria, la vertiente cualitativa del análisis se centró en la categorización y extracción de citas literales de las justificaciones abiertas del alumnado, lo que permitió triangular los datos estadísticos y evidenciar con mayor profundidad el cambio conceptual experimentado.

4.3 Instrumentos de evaluación

Se diseñó un cuestionario específico sobre expresión génica, administrado como pretest (antes de la intervención) y postest (al término de la secuencia). El instrumento incluía preguntas cerradas de opción múltiple, preguntas abiertas, tablas de clasificación y ítems verdadero/falso (Tabla 1). Los contenidos abordados (definición de gen y proteína, distribución de la información genética en distintos tipos celulares, expresión diferencial de proteínas, efectos de las mutaciones, concepto de expresión génica y localización intracelular del material genético) se seleccionaron a partir del análisis curricular y de la revisión bibliográfica sobre concepciones alternativas (Caballero, 2008).

Tabla 1. Descripción de las preguntas del cuestionario pretest y postest sobre expresión génica

Pregunta (P)	Aspecto abordado	Descripción	Tipo de pregunta
P1 y P2	Definición de gen y proteína	Preguntas tipo test sobre el concepto de gen y proteína	Múltiple
P3a	Información genética	El alumnado debe identificar si diferentes células tienen la misma información hereditaria rellenando una tabla relacionada	Múltiple y cerrada
P3b	Expresión proteica	Los participantes deben identificar si la expresión de ciertas proteínas ocurre en todas, algunas o ninguna célula	Múltiple y cerrada
P4	Expresión genética diferencial de un gen	El alumnado debe responder porque si dos personas tienen un mismo gen se puede expresar de manera diferente	Abierta
P5	Mutaciones	Analiza la comprensión sobre el impacto de las mutaciones en la síntesis proteica.	Múltiple
P6	Expresión genética	Se le pide al alumnado que escriba lo que entiende por expresión genética.	Abierta
P7	Concepto de expresión génica	Se pregunta si todas las células expresan los mismos genes al mismo tiempo.	Abierta
P8 P9 P10	Localización de información hereditaria, cromosomas, genes y ADN	A partir de una tabla se pide que marquen que conceptos genéticos (información hereditaria, cromosomas, cromosomas sexuales, genes y ADN) se encuentran en diferentes tipos de células El alumnado debe situar genes, ADN y cromosomas dentro de la célula con opciones de situarlo en el núcleo, citoplasma o membrana celular Ítems de verdadero/falso sobre presencia de cromosomas, genes y ADN en las células	Múltiple y cerrada

Para evaluar la capacidad de indagación científica se diseñaron cuatro rúbricas analíticas asociadas a las fases activas de la secuencia (formulación de hipótesis, diseño experimental, recogida de datos, explicación científica y obtención de conclusiones). Siguiendo el modelo adaptado de Tuesta Calderón (2021), se establecieron cuatro niveles cualitativos: inicial (0-25%), básico (25-50%), adecuado (50-75%) y experto (75-100%).

Asimismo, se aplicó un cuestionario de evaluación de la actividad por parte del alumnado al término de la propuesta, para que los participantes pudieran dar su opinión sobre la actividad innovadora en comparación con la tradicional, valorar el nivel de dificultad y si la guía del docente fue adecuada.

4.4 Diseño e implementación de la propuesta didáctica

La propuesta didáctica se estructuró en cinco sesiones y siete fases de indagación, siguiendo el modelo de indagación guiada propuesto por Aguilera et al. (2018), Couso et al. (2020) y Riga et al. (2017). El eje central fue el contexto científico de la intolerancia a la lactosa, que permitió conectar los contenidos de expresión génica (especialmente la regulación del gen LCT mediada por el gen MCM6) con una situación cotidiana y significativa para los estudiantes. La tabla 2 resume la estructura de la secuencia.

Tabla 2. Estructura de la secuencia didáctica de indagación

Sesión	Fase indagación	Actividad	Tiempo
1	Diagnóstico / Repaso	Pretest. Repaso conceptos ADN, ARN y proteínas	55 min
2	Fases 1-3	Introducción de la intolerancia a la lactosa. Expresión de ideas previas. Formulación de hipótesis guiada	55 min
3	Fases 4-5	Diseño experimental para comprobar la acción de la lactasa. Realización del experimento y análisis preliminar	55 min
4	Fase 6	Análisis genético: regulación de los genes LCT y MCM6. Predicción del fenotipo a partir de secuencias de ADN	55 min
5	Fase 7	Postest. Respuesta a la pregunta inicial. Evaluación de la actividad	55 min

La secuencia partió de una pregunta contextualizadora sin respuesta obvia: "*¿Por qué las personas intolerantes a la lactosa no pueden digerir bien la leche, mientras que las personas tolerantes la consumen sin problemas?*". A partir de esta pregunta, el alumnado expresó sus ideas previas, formuló hipótesis en grupos sobre las causas genéticas de la intolerancia, diseñó y ejecutó un experimento de laboratorio para verificar la acción de la lactasa, analizó secuencias de ADN real de los genes implicados y extrajo conclusiones para responder nuevamente a la cuestión inicial.

5. Resultados

5.1 Concepciones alternativas detectadas en el pretest

Los resultados del pretest confirmaron que el alumnado de 1.º de Bachillerato presentaba concepciones alternativas en la mayoría de los dominios evaluados, a pesar de haber recibido instrucción formal sobre genética en 4.º de ESO.

En relación con los conceptos básicos, mientras que el 95% del alumnado identificó correctamente la definición de gen, solo el 55% reconoció qué es una proteína, con un 30% que la clasificó como lípido y un 15% como ácido nucleico. Estos resultados coinciden con los de Todd y Kenyon (2016), quienes señalan las dificultades del alumnado para comprender el papel de las proteínas.

Respecto a la distribución de la información genética, ningún participante atribuyó correctamente la información hereditaria a todos los tipos celulares. El alumnado tendió a asignar a cada célula la información que conectaba con su función, resultado en consonancia con Ruiz-González et al. (2017).

En cuanto a la expresión génica diferencial, ningún participante respondió adecuadamente a la pregunta sobre expresión de proteínas en distintos tipos celulares. El 25% dejó en blanco la cuestión sobre el concepto de expresión génica, y solo un 20% mencionó la activación o función de un gen, sin referencia alguna a los procesos moleculares implicados. Un 25% relacionó la expresión génica con conceptos de herencia mendeliana, evidenciando una confusión conceptual documentada en la literatura (Ageitos et al., 2017). En la cuestión sobre expresión diferencial de genes según el tipo celular, solo el 25% respondió correctamente, resultado coherente con los hallazgos de Todd y Kenyon (2016), quienes documentan que el alumnado presenta una dificultad para comprender el papel funcional de las proteínas.

Respecto a la localización intracelular del material genético, los datos mostraron una considerable dispersión. Solo el 30% situó el gen en el núcleo, el 35% los cromosomas, y apenas el 35% identificó que el ADN se encuentra en todos los cromosomas. La confusión entre gen, ADN y cromosoma fue generalizada, en consonancia con los resultados de Caballero (2008).

5.2. Estructura de la propuesta didáctica: secuencia de indagación sobre la intolerancia a la lactosa

La propuesta comenzó con una sesión (sesión 1) destinada a diagnosticar los conocimientos previos mediante un pretest y consolidar los conceptos básicos sobre ADN, ARN y proteínas, necesarios para el desarrollo de la secuencia didáctica.

Las cuatro actividades introducen progresivamente al alumnado en la indagación científica: en primer lugar, contextualizando el problema y guiando la formulación de hipótesis (actividad 1); en segundo lugar, planificando y ejecutando un diseño experimental para contrastarlas (actividad 2, incluida en el anexo); y, finalmente, aplicando el razonamiento genético mediante el análisis de secuencias de ADN reales (actividad 3). La propuesta concluyó con una última sesión (sesión 5), destinada a evaluar la comprensión de la expresión génica, responder a la pregunta inicial y reflexionar sobre los aprendizajes alcanzados (actividad 4). Cada actividad se vincula a una o varias fases del modelo de indagación, permitiendo una progresión coherente desde el planteamiento del problema hasta su resolución fundamentada (Tabla 3).

Tabla 3. Secuencia de la propuesta de indagación sobre la intolerancia a la lactosa

Sesión Actividad	Descripción
Sesión 1 Pretest	Diagnóstico inicial de los conocimientos previos del alumnado sobre la expresión génica
Revisión aspectos generales	Repaso sobre los conceptos clave de ADN, ARN y proteínas, con el objetivo de consolidar los conocimientos previos esenciales para el desarrollo de las actividades posteriores
Sesión 2 **Actividad 1** Situación de contexto Formulación de hipótesis iniciales	Introducción al contexto científico en el que se enmarca la intervención, centrado en la intolerancia a la lactosa, mediante la pregunta inicial: "¿Por qué las personas intolerantes a la lactosa no pueden digerir correctamente la leche, mientras que las personas tolerantes la consumen sin problemas?" (**fase 1 de la indagación**) - Soporte: batería de preguntas orientativas para el debate grupal (si conocen casos de intolerancia, síntomas asociados, alimentos problemáticos, posibles causas y su relación con la genética) (**fase 2 de la indagación**)
	Guía al alumnado en la formulación de hipótesis iniciales sobre las posibles causas moleculares y genéticas del problema abordado (**fase 3 de la indagación**) - Soporte: Texto informativo de apoyo sobre la intolerancia a la lactosa: la lactosa como disacárido (glucosa + galactosa), el papel de la enzima lactasa en el intestino delgado, la fermentación bacteriana en el intestino grueso como causa de los síntomas, y la base genética (gen LCT en el cromosoma 2, regulado por el gen MCM6). Además, una tabla guiada con cuatro preguntas para que el alumnado formule hipótesis razonadas: por qué las personas intolerantes presentan el problema; qué diferencia a una persona intolerante de una tolerante; qué ocurriría si la lactosa no se descompone; cómo influye la genética en la producción de lactasa
Sesión 3 **Actividad 2** Diseño experimental (Anexo)	Planificación, en grupos y de manera guiada, de la metodología experimental para comprobar empíricamente la acción de la lactasa en la digestión de la lactosa, identificando claramente las variables necesarias para obtener datos concluyentes; seguidamente, realización de los experimentos y un primer análisis preliminar de resultados - Contexto aportado: la lactasa descompone la lactosa en glucosa y galactosa; su déficit provoca los síntomas digestivos característicos - Materiales disponibles: leche normal, leche sin lactosa, pastillas de lactasa, tubos de ensayo y tiras reactivas de detección de glucosa - Dos problemas de investigación a resolver mediante diseño propio: (1) cómo demostrar la acción de la lactasa observando la producción de glucosa; (2) cómo diferenciar en el laboratorio leche con y sin lactosa. - Procedimiento pautado en seis pasos: describir las etapas del experimento, indicar el material necesario, formular la hipótesis previa, esquematizar el procedimiento y el resultado esperado, ejecutar el experimento, y registrar resultados contrastándolos con la hipótesis inicial (**fases 4 y 5 de la indagación**) - Dinámica de aula: trabajo por parejas con validación docente del diseño antes de entregar los materiales, y puesta en común final de resultados y conclusiones

Tabla 3. Secuencia de la propuesta de indagación sobre la intolerancia a la lactosa. *Continuación*

Sesión Actividad	Descripción
Sesión 4 Actividad 3 Análisis genético	Desarrollo de un análisis genético detallado sobre la regulación génica relacionada con la lactosa, centrado en el estudio específico del gen MCM6 y su relación con el gen LCT, permitiendo evaluar críticamente los datos obtenidos y establecer conexiones entre los resultados experimentales y los conceptos genéticos fundamentales - Marco conceptual: el gen MCM6 regula la activación/desactivación del gen LCT; la persistencia o no de la lactasa en la edad adulta depende de esta regulación - Elemento clave: el SNP rs4988235 (sustitución C→T en la posición −13910), de carácter dominante, que define tres genotipos posibles (CC: intolerancia; CT y TT: tolerancia) - Tarea de aplicación: a partir de secuencias de ADN de tres pacientes (anonimizadas), el alumnado debía transcribir y traducir el fragmento del gen MCM6 y, con el código genético proporcionado, predecir el genotipo y la condición de tolerancia o intolerancia de cada paciente (**fase 6 de la indagación**) - Preguntas de cierre reflexivo: por qué se toma una muestra de saliva si la lactasa se expresa en el intestino delgado, y de dónde se tomaría la muestra si se quisiera medir directamente el nivel de expresión de la lactasa
Sesión 5 Actividad 4 Respuesta a la pregunta inicial y evaluación global	Respuesta nuevamente a la pregunta inicial planteada al comienzo de la unidad y evaluación global de la actividad, fomentando una reflexión profunda sobre los aprendizajes alcanzados (**fase 7 de la indagación**)
	Medición de la evolución en la comprensión del concepto de expresión génica tras la intervención didáctica (Postest)

Esta secuencia constituye el marco sobre el que se evaluó el desarrollo de las capacidades de indagación científica del alumnado, cuyos resultados se presentan a continuación.

5.3 Evaluación de la capacidad de indagación científica

Los resultados de las rúbricas analíticas permiten confirmar que la propuesta desarrolló de manera efectiva las competencias de indagación en el alumnado. La tabla 4 muestra el porcentaje medio de alumnado que alcanzó el nivel experto en cada fase evaluada. No se incluyen las fases 1 y 2 por su carácter introductorio y de contextualización.

Tabla 4. Porcentaje del alumnado que alcanza el nivel experto (75-100%) en cada fase de indagación

Fase de indagación	Fase 3 Hipótesis	Fases 4-5 Diseño/Datos	Fase 6 Explicación	Fase 7 Conclusiones
% alumnado nivel experto	77,5%	100%	91,67%	85%

La fase de formulación de hipótesis (Fase 3) fue la que mostró mayor dificultad para el alumnado, con un 77,5% de nivel experto. Este resultado es coherente con la literatura especializada, que señala la formulación de hipótesis como una de las tareas cognitivas más complejas para el alumnado de secundaria (Ferrés-Gurt, 2017). No obstante, el 55%

del alumnado alcanzó el nivel experto desde el inicio de la aplicación de la propuesta, proponiendo hipótesis precisas con referencias explícitas al gen LCT y a su regulación por el gen MCM6.

Las fases de diseño experimental y recogida de datos (Fases 4 y 5) mostraron el desempeño más alto, con el 100% del alumnado en nivel experto. Todos los grupos identificaron las variables, planificaron el procedimiento, registraron los datos y extrajeron conclusiones fundamentadas en la evidencia. Estos resultados son concordantes con estudios de otros autores (Aguilera et al., 2018; Cristóbal y García, 2013).

La fase de explicación científica a partir de conocimientos adquiridos (Fase 6) alcanzó un 91,67% de nivel experto. El 80% del alumnado respondió correctamente sobre la localización de la expresión de lactasa en el intestino delgado, y el 95% justificó adecuadamente la toma de muestra de ADN en saliva, argumentando que el material genético es idéntico en todas las células, aunque la expresión de la proteína sea específica de tejido. La fase de obtención de conclusiones (Fase 7) alcanzó el 85%, y el 45% del alumnado integró en sus explicaciones la función del gen LCT, su regulación por MCM6 y las consecuencias fenotípicas de las mutaciones.

5.4 Efectos de la propuesta sobre la comprensión de la expresión génica

La comparación entre los resultados del pretest y del postest muestra mejoras en la mayoría de los dominios evaluados. Así, el análisis de los datos, confirmó la existencia de diferencias significativas en el rendimiento del alumnado entre el pretest y el postest según la prueba de rangos con signo de Wilcoxon ($W = 1.50$, $p = .009$), evidenciando además un tamaño del efecto grande (d de Cohen = 1.24).

La comprensión de la distribución de la información genética mejoró notablemente: mientras que en el pretest ningún estudiante atribuyó la información hereditaria a todos los tipos celulares, en el postest lo hizo el 30%; la atribución del color de ojos a células somáticas pasó del 10% al 60% y la del color de piel a células musculares del 25% al 80%.

La comprensión de la expresión génica diferencial también mejoró. La pregunta abierta sobre el concepto de expresión génica mostró un cambio cualitativo relevante: en el postest, un 30% definió el proceso en términos moleculares (transcripción y traducción), categoría ausente en el pretest, y un 20% lo vinculó al fenotipo.

En la cuestión P7 sobre la expresión de los genes en todas las células, las respuestas correctas aumentaron del 25% al 60%. Esta mejora también se reflejó en argumentaciones. Como señaló el estudiante E05, “No, todos poseen genes, pero solo los expresan en la zona necesitada. Ejemplo lactosa en el intestino delgado” (Estudiante 05).

La tabla 5 resume la evolución de las respuestas en esta pregunta.

Tabla 5. Evolución de las respuestas a la pregunta sobre expresión génica diferencial (P7)

Categoría de respuesta	Pretest (%)	Postest (%)
Depende del tipo celular / función / especialización	25	60
Todas las células expresan los mismos genes	20	20
Confusión expresión génica con tener genes diferentes	15	5
Mutaciones, fallos o herencia genética	15	0
Sin respuesta	10	15

La comprensión del papel de las mutaciones mejoró moderadamente: el porcentaje de alumnado que mencionó mutaciones como causa de variabilidad en la expresión génica pasó del 0% al 45%, como ilustra la respuesta del estudiante E03, "ocurre porque dentro del gen puede haber modificaciones o mutaciones, que, aunque sea el mismo gen se expresa distinto" (Estudiante 03). Las referencias a la regulación génica, ausentes en el pretest, aparecieron en el 20% del postest. La pregunta sobre el impacto de una mutación en la síntesis proteica mostró cierta mejora, con un 70% de respuestas correctas en el postest frente al 65% del pretest.

En la localización del material genético, la mejora fue igualmente notoria. El porcentaje de alumnado que situó correctamente el gen en el núcleo pasó del 30% al 70%, el de cromosomas del 20% al 65% y la identificación de que el ADN está presente en todos los cromosomas del 35% al 70%.

Como excepción a la tendencia positiva, la cuestión sobre qué es una proteína mostró un leve retroceso, con un aumento de respuestas incorrectas del 15% al 35% en la opción que identificaba a las proteínas como ácidos nucleicos, lo que sugiere una posible interferencia del aprendizaje de ARN durante la secuencia. Este resultado indica la necesidad de reforzar la distinción entre biomoléculas en futuras intervenciones.

En conjunto, los datos reflejan un avance significativo desde una concepción limitada de la genética hacia una visión más integrada. Esta mejora puede atribuirse al enfoque indagativo y al uso de un contexto cercano, como la intolerancia a la lactosa, que favorece la construcción significativa del conocimiento (Couso et al., 2020; Domènech-Casal, 2016).

5.5 Evaluación de la propuesta por el alumnado

Los resultados del cuestionario de evaluación final muestran una valoración muy positiva de la propuesta. La totalidad del alumnado manifestó preferencia por el aprendizaje basado en actividades frente a la enseñanza tradicional; estos hallazgos corroboran los planteamientos de Aguilera et al. (2018) y Couso et al. (2020) respecto a la eficacia de los enfoques prácticos en la enseñanza de las ciencias. El 80% de los estudiantes percibió una disminución en la dificultad al realizar el postest respecto al pretest. El 100% indicó que la actividad experimental les ayudó a comprender mejor los conceptos científicos, destacando la dimensión práctica y visual del aprendizaje. La guía docente también fue valorada positivamente, con referencias a la claridad en la resolución de dudas y la paciencia mostrada durante el proceso.

6. Discusión

Los resultados obtenidos son coherentes con las hipótesis planteadas y con la literatura previa sobre aprendizaje de la genética y eficacia de la indagación científica. Respecto a la H1, las concepciones alternativas detectadas replican fielmente los patrones documentados en investigaciones anteriores (Caballero, 2008; Ruiz-González et al., 2017), lo que evidencia la necesidad de intervenciones específicas y contextualizadas.

En cuanto a la H2, la propuesta diseñada demuestra que es posible articular una secuencia de indagación guiada coherente y viable en el contexto del Bachillerato, tomando como problemática de referencia la intolerancia a la lactosa. La elección de la intolerancia a la lactosa resultó adecuada por su cercanía al alumnado y su vinculación directa con la regulación de los genes LCT y MCM6, permitiendo relacionar los niveles molecular, celular y fenotípico de la expresión génica. Estos resultados refuerzan el valor de utilizar contextos cotidianos para favorecer el interés y una actitud positiva hacia la ciencia (Caamaño, 2005).

Los resultados de la H3 muestran mejoras conceptuales significativas en los dominios más complejos de la expresión génica: la comprensión de la expresión diferencial de genes según el tipo celular, la localización del material genético y el vínculo entre mutaciones y variabilidad fenotípica. Estos avances son coherentes con los reportados por Domènech-Casal (2016) en una propuesta similar de indagación sobre expresión génica en el ámbito del cáncer y nos confirman el potencial de la intolerancia a la lactosa como contexto para el aprendizaje de conceptos abstractos. (Sadler, 2011).

El alto desempeño en las fases experimentales (100% en nivel experto) contrasta con la mayor dificultad en la formulación de hipótesis y en la integración de conclusiones finales. Esta asimetría sugiere que, si bien el alumnado puede operar competentemente en las dimensiones procedimentales de la indagación cuando recibe el apoyo adecuado, las demandas de orden superior (como la formulación de predicciones fundamentadas y la integración de evidencias diversas) requieren mayor andamiaje y experiencia en la práctica indagativa (Aguilera et al., 2018; Ferrés-Gurt, 2017). Esto refuerza la importancia de incorporar la indagación de forma progresiva y sistemática a lo largo de la escolarización.

El retroceso observado en la comprensión del concepto de proteína (con un aumento de respuestas que la identifican como ácido nucleico) constituye un hallazgo inesperado que merece atención en futuros diseños. Una interpretación plausible es que la intensa exposición al concepto de ARN durante la secuencia haya generado una interferencia proactiva, confundiendo al alumnado entre los dos tipos de ácidos nucleicos y las proteínas como categoría independiente. Este resultado sugiere reforzar la distinción entre biomoléculas en las fases iniciales de la secuencia.

Finalmente, la valoración positiva del alumnado refuerza los resultados obtenidos, indicando una mayor motivación y satisfacción con el proceso de aprendizaje, factores que la investigación ha vinculado con la retención a largo plazo del conocimiento (Couso et al., 2020; Rentería, 2023).

7. Conclusiones e implicaciones para la enseñanza

Este trabajo aporta evidencias empíricas sobre la eficacia de una propuesta didáctica de indagación guiada, contextualizada en la problemática de la intolerancia a la lactosa, para mejorar la comprensión de la expresión génica y desarrollar competencias de indagación científica en estudiantes de 1.º de Bachillerato. Las conclusiones principales son:

- El alumnado de 1.º de Bachillerato presenta concepciones alternativas sólidas sobre la expresión génica, incluso tras instrucción formal, que afectan a los dominios conceptuales más fundamentales: relación gen-proteína, distribución de la información genética y regulación de la expresión.
- La secuencia de indagación guiada articulada en torno a la intolerancia a la lactosa es viable, coherente con el marco curricular y eficaz para abordar estas dificultades de aprendizaje en el aula de Bachillerato.
- La propuesta produjo mejoras conceptuales significativas, especialmente en la comprensión de la expresión génica diferencial, la localización del material genético y el vínculo entre mutaciones y variabilidad fenotípica.
- Las competencias de indagación científica se desarrollaron de manera muy satisfactoria, especialmente en las fases experimentales, aunque la formulación de hipótesis y la obtención de conclusiones integradoras requieren mayor andamiaje.
- El alumnado valoró positivamente la propuesta frente a la enseñanza tradicional, destacando el aprendizaje práctico y la guía docente como elementos clave.

No obstante, los resultados deben interpretarse a la luz de algunas limitaciones inherentes al diseño del estudio. La más relevante es la ausencia de grupo control, consecuencia de las condiciones organizativas del centro, que impide atribuir con plena certeza los cambios conceptuales observados exclusivamente a la propuesta didáctica. Por otra parte, el tamaño de la muestra, restringe la generalización de los resultados a otros contextos educativos, niveles o perfiles de alumnado. Investigaciones futuras deberían replicar la propuesta con muestras más amplias y diversas, incorporar un grupo control y explorar la transferencia de los aprendizajes a medio y largo plazo.

Desde el punto de vista de las implicaciones para la enseñanza, este trabajo sugiere que la incorporación temprana de metodologías activas basadas en la indagación, aun en cursos donde los contenidos de genética molecular son limitados curricular mente, puede contribuir de manera significativa a la alfabetización científica del alumnado. En este sentido, la intolerancia a la lactosa constituye un contexto cercano para introducir la regulación génica antes de su tratamiento formal en 2.º de Bachillerato.

Agradecimientos

Esta investigación se ha llevado a cabo dentro del proyecto PID2023-150136OB-I00 financiado por Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Proyectos de Generación de Conocimiento 2023.

Referencias bibliográficas

Ageitos, N., Puig, B., y Calvo-Peña, X. (2017). Trabajar genética y enfermedades en secundaria integrando la modelización y la argumentación científica. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias, 14*(1), 86-97. https://doi.org/10.25267/rev_eureka_ensen_divulg_cienc.2017.v14.i1.07

Aguilera, D., Tobías, M., Martín-Páez, V., Vílchez-González, M., y Perales-Palacios, F. J. (2018). La enseñanza de las ciencias basada en indagación. Una revisión sistemática de la producción española. *Revista de Educación, 381*, 259-284. https://doi.org/10.4438/1988-592X-RE-2017-381-388

Caamaño A. (2005) Presentación de la monografía: Contextualizar la ciencia. Una necesidad en el nuevo currículo de ciencias. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales, 46*, 5-8.

Caballero, M. (2008). Algunas ideas del alumnado de secundaria sobre conceptos básicos de genética. *Enseñanza de las Ciencias, 26*(2), 227-244. https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3677

Couso, D., Jiménez-Liso, M. R., Refojo, C., y Sacristán, J. A. (2020). *Enseñando ciencia con ciencia*. FECYT y Fundación Lilly. https://ddd.uab.cat/record/220343

Cristóbal, C. M., y García, H. A. (2013). La indagación científica para la enseñanza de las ciencias. *Horizonte de la Ciencia, 3*(5), 99-104. https://revistas.uncp.edu.pe/index.php/horizontedelaciencia/article/view/200

Domènech-Casal, J. (2016). Gene Hunting: una secuencia contextualizada de indagación alrededor de la expresión génica, la investigación in silico y la ética en la comunicación biomédica. *Revista Eureka, 13*(2), 342-358. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2016.v13.i2.08

Duncan, R. G., y Reiser, B. J. (2007). Reasoning across ontologically distinct levels: Students' understandings of molecular genetics. *Journal of Research in Science Teaching, 44*(7), 938-959. https://doi.org/10.1002/tea.20186

Ferrés-Gurt, C. (2017). El reto de plantear preguntas científicas investigables. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias, 14*(2), 410-426. https://doi.org/10.25267/rev_eureka_ensen_divulg_cienc.2017.v14.i2.09

Lewis, J., y Leach, J. (2006). Discussion of socio-scientific issues: The role of science knowledge. *International Journal of Science Education, 28*(11), 1267-1287. https://doi.org/10.1080/09500690500439348

LOMLOE (2020). Ley Orgánica 3/2020, de 29 de diciembre, por la que se modifica la Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación. Boletín Oficial del Estado, 340, 122868-122953. https://www.boe.es/eli/es/lo/2020/12/29/3

Marbach-Ad, G., Rotbain, Y., y Stavy, R. (2008). Using computer animation and illustration activities to improve high school students' achievement in molecular genetics. *Journal of Research in Science Teaching, 45*(3), 273-292. https://doi.org/10.1002/tea.20222

Muñoz-Campos V, Franco-Mariscal A.J. y Blanco-López A. (2020) Integración de prácticas científicas de argumentación, indagación y modelización en un contexto de la vida diaria. Valoraciones de estudiantes de secundaria. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias 17*(3), 3201. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i3.3201

Muñoz Campos, V. E. (2021). *Aprendizaje del cambio químico y desarrollo de prácticas científicas en una secuencia de enseñanza-aprendizaje para educación secundaria obligatoria en el contexto del consumo y elaboración de yogur* [Tesis doctoral, Universidad de Málaga]. Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga. https://hdl.handle.net/10630/22464

Real Decreto 217/2022, de 29 de marzo, por el que se establece la ordenación y las enseñanzas mínimas de la Educación Secundaria Obligatoria. *Boletín Oficial del Estado, 76*, 41571-41789. https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/03/29/217

Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato. *Boletín Oficial del Estado, núm. 82*, de 6 de abril de 2022, pp. 46047-46408. https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/04/05/243

Rentería, Z. (2023). La indagación como modelo de aprendizaje para la optimización del Sistema Educativo. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7*(3), 5502-5517. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6569

Riga, F., Winterbottom, M., Harris, E., y Newby, L. (2017). Inquiry-based science education. En *Science Education* (pp. 247-261). SensePublishers. https://doi.org/10.1007/978-94-6300-749-8_19

Rocard, M., Csermely, P., Jorde, D., Walberg-Henriksson, H., y Hemmo, V. (2007*). A Renewed Pedagogy for the Future of Europe.* Economy and Society.

Ruiz-González, C., Banet, E., y López-Banet, L. (2017). Conocimientos de los estudiantes de secundaria sobre herencia biológica: implicaciones para su enseñanza. *Revista Eureka, 14*(3), 550-569. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2017.v14.i3.04

Sadler, T. D. (2011). Situating socio-scientific issues in classrooms as a means of achieving goals of science education. En T. D. Sadler (Ed.), Socio-scientific issues in the classroom (pp. 1-9). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1159-4_1

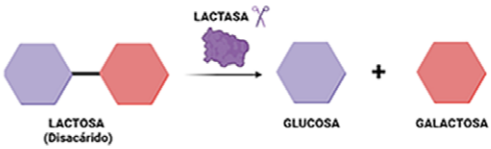
Todd, A., y Kenyon, L. (2016). Empirical refinements of a molecular genetics learning progression: The molecular constructs*. Journal of Research in Science Teaching, 53*(9), 1385-1418. https://doi.org/10.1002/tea.21262

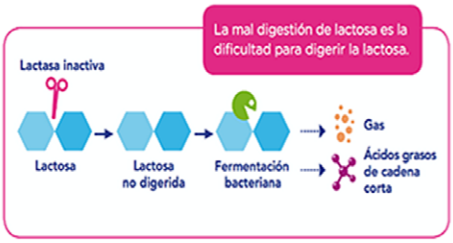
Tuesta Calderón, N. D. (2021). La rúbrica como instrumento de evaluación de la competencia de indagación científica. *Revista ConCiencia EPG, 6*(1). https://doi.org/10.32654/concienciaepg.6-1.2

ANEXO

Actividad 2. Diseño experimental

Como ya sabéis, la lactosa es digerida en el intestino delgado, en personas sin problemas de intolerancia, por la acción de la proteína enzimática lactasa, que la descompone en glucosa y galactosa.





Hoy en día sabemos que las personas con intolerancia a la lactosa producen poca lactasa, lo que les provoca problemas intestinales (diarrea, gases e hinchazón) al consumir alimentos lácteos.

Por ello evitan estos alimentos o toman **pastillas de lactasa** antes de consumirlos, facilitando así su digestión.

En el **laboratorio disponemos de los siguientes materiales:**





-Leche normal (con lactosa)
-Leche sin lactosa
-Pastillas de lactasa
-Tubos de ensayo
-Tiras reactivas que detectan la presencia de glucosa, en líquido cambiando de color desde amarillo (sin glucosa) hasta azul oscuro (mucha glucosa).

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente y el material disponible, diseñad dos experiencias de laboratorio para **resolver los siguientes problemas de investigación:**

1. **¿Cómo demostrarías la acción de la proteína enzimática lactasa en la digestión de la lactosa, observando la producción de glucosa como producto de la reacción?**

2. **¿Cómo diferenciarías en el laboratorio la leche con lactosa y la leche sin lactosa?**

Para **cada problema de investigación** deberéis **responder los siguientes puntos**:
1) Describir, paso a paso, todas las **etapas** del proceso experimental.
2) Indicad el **material** que usareis en cada caso.
3) Establecer cual es vuestra **hipótesis** en cada caso antes de llevar a cabo los experimentos.
4) Haced un **dibujo** de lo que vais a hacer y lo que **esperáis que ocurra** en cada caso.
5) **Realizar** el experimento
6) Anotad resultados de cada condición y contrastarlos con las hipótesis iniciales (punto 3), es decir obtener **conclusiones**.