

6. «¿Cómo es el río Tinto y su entorno?»: ecosistema y su geología en Educación Secundaria

ALEJANDRO CARLOS CAMPINA LÓPEZ

Universidad de Huelva, alejandro.campina@ddi.uhu.es

YOLANDA GONZÁLEZ CASTANEDO

Universidad de Huelva, yolanda.gonzalez@ddcc.uhu.es

RAQUEL ROMERO FERNÁNDEZ

Universidad de Huelva, raquel.romero@pi.uhu.es

1. Introducción

Este capítulo forma parte, al igual que los capítulos 5 y 7, de una misma situación de aprendizaje desarrollada en el 4.º curso de Educación Secundaria Obligatoria cuyo centro de interés y contexto de enseñanza-aprendizaje es el río Tinto y su entorno natural, cultural y social. La situación de aprendizaje se configura como un proyecto interdisciplinar de educación patrimonial (Trabajo y Cuenca, 2022), que parte del patrimonio del entorno próximo del alumnado para la integración de contenidos de distintas disciplinas con el objetivo de dar respuesta a la pregunta principal: «¿Conservar o restaurar el río Tinto?».

Esta situación de aprendizaje, en línea con los objetivos generales de la etapa de Educación Secundaria Obligatoria, establecidos en el Real Decreto 217/2022, pretende que el alumnado conciba el conocimiento científico como un saber integrado que permite aplicar métodos para identificar y buscar soluciones a las problemáticas desde los distintos campos del conocimiento y la experiencia. Así, a través de este proyecto, el alumnado analiza su contexto cercano para comprender la interrelación entre el ser humano y el medioambiente, así como los cambios y persistencias en la cultura y la sociedad a lo largo del tiempo (de la Vega Zamorano e Iranzo García, 2021), a través de la implementación conjunta de procesos educativos de indagación, modelización y pensamiento computacional (Campina-López *et al.*, 2023).

Este capítulo aborda la subpregunta de investigación escolar: «¿Cómo es el río Tinto y su entorno?», explorando en profundidad los elementos y características del ecosistema propio del río Tinto. A través de diversas

actividades, se trabajarán contenidos tanto de Biología como de Geología, diseñados para estudiar y comprender este singular entorno natural.

2. Marco teórico

La etapa de Educación Secundaria puede ser fundamental para consolidar el conocimiento científico del alumnado, así como su capacidad de analizar críticamente los ecosistemas y los fenómenos naturales que los afectan. El funcionamiento de los ecosistemas fluviales ofrece numerosos beneficios al ser humano y poseen un valor cultural como herramienta educativa (Koundouri *et al.*, 2017). Sin embargo, la presión que ejercen las actividades humanas a través de la industria, los usos del suelo, la urbanización, la extracción de agua y la modificación de los cauces radican en afecciones sobre su hábitat, su geomorfología, la química del agua y la estructura biótica (Allan *et al.*, 2021), convirtiéndose, así, en uno de los entornos más amenazados del mundo y haciendo que su restauración, conservación o gestión sea perentoria (Díez López *et al.*, 2024).

El río Tinto se ubica en el suroeste de España en la denominada Faja Pirítica, provincia de Huelva. Se trata de una de las regiones geológicas más importantes del mundo por su concentración de sulfuros masivos y que ha originado un impacto directo en las condiciones del río, debido a minerales presentes como la pirita o la calcopirita. El río y su entorno se declaró un Paisaje Protegido por la Junta de Andalucía mediante el Decreto 558/2004 del 14 de diciembre, debido al gran interés que suscitan las características de su inusual ecosistema fluvial, cuyas aguas son de un intenso color rojo, con un alto contenido en metales pesados y una extrema acidez. A pesar de estas condiciones, ha tenido lugar el desarrollo de organismos extremófilos, tanto en sus aguas con bacterias quimiolitótrofas (que se alimentan de rocas), algas, hongos y protozoos como también en los suelos afectados por estas como es el caso de la presencia de *Erica andevalensis*, un brezo endémico de la zona (Córdoba García, 2022).

Gracias al desarrollo de estos organismos y plantas adaptadas a condiciones no aptas para la mayoría de los seres vivos, el río Tinto se convierte en un «laboratorio natural» de vida extremófila, que ha llegado a ser objeto de estudio para la comunidad científica. El Centro de Astrobiología (CAB), el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), en con-

junto con la NASA, llevan desde 2014 investigando el entorno del río Tinto a través del *Life-detection Mars Analog Project* (LMAP) o «Proyecto de detección de vida en un análogo marciano». Este proyecto se centra en estudiar cómo las condiciones extremas del río Tinto, similares a las de Marte, pueden ofrecer claves sobre la existencia de vida en entornos hostiles, proporcionando un valioso análogo terrestre para futuras misiones de exploración marciana (Sánchez-García *et al.*, 2020).

Por otro lado, el estudio de los ecosistemas desde una perspectiva interdisciplinar es esencial para que el alumnado comprenda las dimensiones científicas y sociales de los problemas ambientales, que afectan tanto a los seres humanos como a otras especies. Es fundamental que desarrollen una comprensión compleja para analizar y tomar decisiones informadas sobre el impacto ambiental, lo que, a su vez, fomenta un pensamiento profundo y les impulsa a proyectar acciones alineadas con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) (Cabrera Castillo y Ortiz, 2022). Del mismo modo, en la Orden de 30 de mayo de 2023, en la que se establece el currículo de Educación Secundaria en Andalucía, se fomenta una educación ambiental interdisciplinar y se enfatiza la necesidad de desarrollar en los estudiantes una comprensión integral del medioambiente, enfocándose no solo en la adquisición de conocimiento científico, sino también en la sensibilización activa hacia la conservación de los ecosistemas. Esto entra en consonancia con el ya mencionado Decreto 58/2023, donde se promueve específicamente la difusión de valores naturales, faunísticos, botánicos, paisajísticos y culturales, y la implicación de la población local en la conservación de estos espacios.

3. Descripción y justificación de la controversia

La pregunta que se abordará será: «¿Hay vida en el río Tinto?». El río Tinto y su entorno ha generado una discusión científica en relación con diferentes aspectos como, por ejemplo, la presencia de vida en este entorno y el valor bioecológico de las especies que lo habitan. Respecto a los contenidos de Biología y Geología, la controversia que se planteó al alumnado está basada en si estas condiciones extremas permiten o no la vida y, tras ello, por qué el río es así y qué papel juegan estos organismos en la conservación o restauración del ecosistema.



Figura 1. Fotografía de la visita a la cabecera del río Tinto en la Sierra de Padre Caro (Huelva).

Fuente: elaboración propia.

En el río Tinto (figura 1) y su entorno se llevaron a cabo procedimientos poco eficaces y, sobre todo, poco respetuosos con el medioambiente, debido a la metalurgia del siglo XIX y de la mayor parte del siglo XX. Asimismo, el abandono a la intemperie de restos de materiales muy fragmentados derivados de la actividad minera (las llamadas *escombreras*) también influyeron en la contaminación del río (Córdoba García, 2022). Por otro lado, se han evidenciado procesos naturales de drenaje ácido desarrollado por las bacterias (Olías y Nieto, 2012) que llevan produciéndose desde hace al menos 2 millones de años, según análisis de sedimentos en su desembocadura. Esto ha dado lugar al enfrentamiento de dos posturas científicas sobre la causa principal las actuales características del río:

Estudios como los de Gómez-Ortiz *et al.* (2014) han demostrado la existencia de microorganismos extremófilos que sobreviven en las aguas ácidas del río y se argumenta que las bacterias quimiolitótrofas han sido las responsables principales de las condiciones extremas del río durante millones de años. Además, se considera que la influencia de la actividad minera es secundaria frente a estos procesos biológicos. Para los defensores de esta postura, el río Tinto es un laboratorio natural de biodiversidad extrema, cuyo valor bioecológico y especies endémicas deben ser objeto de protección, ya que la vida en condiciones extremas proporciona una oportunidad única para explorar los límites de la vida y su evolución en ambientes hostiles.

Por otro lado, científicos como Olías y Nieto (2015) argumentan que la actividad minera ha intensificado las condiciones extremas del río, afectando negativamente a su biodiversidad. Consideran que el impacto de la actividad biológica en la situación actual del río es insignificante en comparación con la enorme cantidad de residuos y escombros expuestos como resultado de las actividades mineras llevadas a cabo, especialmente durante los años 1850-2001. Según esta postura, la explotación minera ha aumentado la acidez del agua y ha provocado la pérdida de hábitats. En consecuencia, entienden que es importante desarrollar estrategias de restauración del río para mitigar los efectos de la contaminación y recuperar la calidad de las aguas, así como su biodiversidad perdida.

De esta forma, el estudio del río Tinto como patrimonio controversial adquiere un gran potencial educativo (Cuenca, 2014; Estepa, 2024), ya que permite suscitar debates o conflictos, ya sean de carácter ideológico, político, social, cultural o medioambiental (Arroyo *et al.*, 2022), que favorecen el desarrollo de las competencias específicas mediante el estudio de un ecosistema que ha sido de gran interés para la investigación astrobiológica.

4. Diseño de la propuesta

La situación de aprendizaje titulada «¿Cómo es el río Tinto y su entorno?» tiene como objetivo principal que el alumnado, a través del estudio de un patrimonio controversial como el río Tinto y su entorno, desarrolle una comprensión profunda y crítica sobre cómo los organismos y las características geológicas del entorno se adaptan a condiciones extremas, además de analizar los procesos naturales y antrópicos que han caracterizado este ecosistema.

La propuesta se realizó a través de un enfoque de indagación guiada en ciencias, a partir de estas cuestiones, con el objetivo de permitir al alumnado desarrollar sus propias ideas gracias a un aprendizaje basado en la experimentación y construir así su conocimiento del mundo natural (Nudelman, 2015). La enseñanza por indagación, junto con la modelización, en su dimensión instrumental, puede ayudar en la construcción de procesos de andamiaje que han de guiar los procesos de enseñanza, ante tareas como conceptualizar, reflexionar, visualizar, ilustrar, representar, etc. (Oliva, 2021). La indagación se considera una actividad esencial para la ciencia erudita que conlleva expresar, usar, evaluar, revisar, predecir y evaluar problemas, situaciones, procesos o conceptos como vía para la comprensión o generación de conocimiento (Campina-López *et al.*, 2023). Ambos enfoques son los más

promovidos por la didáctica de las ciencias actualmente (Soysal, 2021; Couso *et al.*, 2020) y junto a metodologías como la resolución de problemas, el aprendizaje basado en proyectos y el aprendizaje interactivo, todo ello mediado por la tecnología, social y cooperativo, permiten al estudiantado acercarse a la alfabetización científica (Vázquez-Alonso y Manassero-Mas, 2018), la cual es el primer paso en el camino hacia el desarrollo de la capacidad de pensar (Martínez-Suárez, 2022).

Así, durante dos semanas, el proyecto se estructuró alrededor de preguntas clave formuladas por el alumnado: «¿Cómo afecta a la fauna y la flora?», «¿Nace contaminado?» y «¿Cómo nos afecta?». Estas preguntas fueron la puerta de entrada al estudio de los parámetros bioecológicos y geológicos del río, así como su caracterización como ecosistema. De esta forma, el alumnado obtendría información relevante que ayudaría a dar respuesta a la primera subpregunta en la que se centra este primer capítulo: «¿Cómo es el río Tinto y su entorno?».

Tras presentar el río Tinto y realizar una lluvia de ideas, el desarrollo del proyecto se organizó mediante varias misiones que guiaron el proceso de aprendizaje.



En esta imagen podemos observar el nacimiento del río, que tiene lugar en la sierra de Padre Caro del municipio de Nerva. Además, podemos observar que el río comienza en una zona muy rocosa, con muy poca agua y con discontinuidades y que su continuación se encuentra más abajo, en el Barranco de Agua Dulce. Su color de agua es rojo oscuro y en los alrededores del río se encuentran muchos árboles.



En esta zona, observamos que empieza a tener continuidad el agua y que su cauce se encuentra dividido en dos canales. El río sigue manteniendo el mismo color y se aprecia que hay menos árboles a sus alrededores.



En esta imagen, apreciamos que el río vuelve a estar rodeado de mucha vegetación, con el mismo color aunque sí que tiene más desvíos (curvas).

Figura 2. Captura de pantalla de un sitio web construido por un grupo de alumnos y alumnas donde describen lo que ven a través de Google Maps.

Fuente: elaboración propia.

El alumnado realizó una caracterización inicial del río Tinto mediante imágenes aéreas de Google Maps, identificando su nacimiento, desembocadura, morfología y cambios en el cauce (figura 2). También exploraron qué tipo de vegetación y especies animales habitan la zona, formulando, además, hipótesis científicas sobre el origen de la acidez y el color del agua, como parte del proceso del enfoque indagatorio.

Se realizaron búsquedas de información en diversas fuentes y compararon el río Tinto con otros ríos cercanos, como el Odiel, para identificar y caracterizar cada ecosistema fluvial. Asimismo, para conocer cómo afecta a la fauna y flora, estudiaron la biocenosis y la falta de vegetación, además de los organismos extremófilos.

El estudio de la acidez del río y su impacto se desarrolló a partir de preguntas surgidas de su curiosidad, como: «¿Cómo nos afecta?». En concreto, el alumnado investigó en diversas fuentes proporcionadas por el docente, sobre los efectos del pH ácido del río en organismos vivos y, en especial, en el ser humano. A su vez, con el objeto de que el estudiante conociera el resto de las características fisicoquímicas, se planteó cuáles de ellas eran necesarias para caracterizar cualquier río. Esto dio pie a que cada grupo concretara una característica con su definición, unidad e instrumento de medida. En este sentido, debido a la imposibilidad de adquirir algunos de los instrumentos, se originó la necesidad de construirlos. En concreto, a través de la programación basada en bloques realizada en [Makecode.org](https://makecode.org), se construyeron algunos sensores conectados a placas controladoras *BBC Micro Bit*, que se usaron para la toma de datos en una salida de campo al río Tinto.



Figura 3. Fotografías realizadas por alumnos representando con hashtags parte de la geología y biología de la zona.

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, para conocer el origen de su contaminación, investigaron acerca de las dos posturas de la controversia científica y, posteriormente, se realizó una visita a la cabecera del río Tinto. Allí se realizaron fotografías de elementos geológicos y biológicos que etiquetaron y subían las fotos a redes sociales como Instagram usando *#hashtags* (etiquetas) con breves descripciones (figura 3). Además, se recolectaron muestras de agua y suelo en diferentes puntos del río, con la intención de realizar una toma de datos de diferentes parámetros fisicoquímicos en el cauce principal y sus primeros afluentes con los instrumentos digitales construidos y programados por el alumnado.

También se investigó cómo la geología del entorno, especialmente la presencia de sulfuros y minerales pesados, contribuye a las condiciones extremas del río. A su vez, se compararon las características de las formaciones geológicas del río con otros entornos menos hostiles, discutiendo cómo estas diferencias condicionan la vida en cada lugar y se trabajó con un cuaderno de campo en el que documentaron sus observaciones y análisis sobre el ecosistema del río Tinto, utilizando la información obtenida en clase y en la salida de campo para responder a las preguntas planteadas.

Ante la necesidad de comprender cómo afectan cambios de pH y turbidez en el ecosistema, así como de caracterizar la distribución de especies vegetales, como la *Erica andevalensis*, con la ayuda de imágenes de satélite el alumnado consensuó y diseñó una maqueta de la cabecera del río que serviría como modelo que, con los datos y muestras tomadas a lo largo del cauce. Esto propiciaría el desarrollo del ciclo de la modelización (Couso *et al.*, 2020), que ayudaría al alumnado a plantear las primeras hipótesis y dar respuesta a preguntas sobre la presencia y condiciones de vida dentro y fuera del río.

Finalmente, las actividades concluyeron con un debate final en el que el alumnado, entre otros ámbitos, discutió los aspectos fisicoquímicos e históricos del río Tinto, posicionándose sobre la necesidad de restaurar el ecosistema para reducir la acidez y recuperar la biodiversidad, o conservarlo tal como es, destacando su valor científico, turístico y educativo.

4.1. Participantes

La situación de aprendizaje en la que se incluye la secuencia didáctica presentada en este capítulo fue implementada en el 4.º curso de Educación Secundaria Obligatoria de un centro concertado de Educación

Infantil, Primaria y Secundaria, situado en Valverde del Camino, municipio de la provincia de Huelva. La clase participante en la experiencia educativa se corresponde con un grupo de 28 estudiantes de entre 15 y 16 años.

Valverde del Camino es una localidad situada en la comarca onubense del Andévalo, en la cual la repercusión de la actividad minera, los cambios sociales y culturales en la Cuenca Minera y las investigaciones y modificaciones en el río Tinto y su entorno son notables. Por ello, además de por la accesibilidad y disponibilidad del equipo docente del centro educativo, este contexto es idóneo para realizar un acercamiento educativo interdisciplinar al río Tinto.

4.2. Instrumento de planificación didáctica: la secuencia

La situación de aprendizaje, compuesta por las tres secuencias didácticas presentadas en este libro, fue diseñada con el objetivo de dar respuesta a la pregunta de investigación escolar: «¿Conservar o restaurar el río Tinto?» y para contribuir a un doble producto final. Por un lado, el alumnado confeccionó un guion para la grabación de un *podcast* colaborativo en el que plasmar las controversias asociadas al río Tinto y sus reflexiones tras haber estudiado en profundidad el río desde las tres áreas curriculares. Dicho *podcast* participó en el III Concurso Nacional de Podcast Escolar organizado por RTVE y pudo difundirse *a posteriori* entre las familias del alumnado y el resto de la comunidad educativa. Por otro lado, una semana después de la finalización de la situación de aprendizaje, se desplazaron hasta la Universidad de Huelva y expusieron, en la Facultad de Ciencias Experimentales y en la Facultad de Educación, Psicología y Ciencias del Deporte, los resultados de su proyecto, las respuestas a todas las preguntas de investigación planteadas y los aprendizajes adquiridos a través de este.

Desde el área de Biología y Geología, a partir de la subpregunta: «¿Cómo es el río Tinto y su entorno?», las actividades de la secuencia didáctica se diseñaron para contribuir a las competencias específicas. En concreto, fueron extraídas en su formulación original de la Orden de 30 de mayo de 2023 y trabajadas de la siguiente forma:

- CE 1. Interpretar y transmitir información y datos científicos, argumentando sobre ellos y utilizando diferentes formatos, para analizar conceptos y procesos de las ciencias biológicas y geológicas. El alumnado analiza y discute datos recogidos sobre la geología y ecología

del río Tinto, utilizando diversas herramientas digitales y formatos para comunicar sus hallazgos. Esto incluye la presentación de datos en mapas interactivos, informes escritos y presentaciones orales.

- CE 2. Identificar, localizar y seleccionar información, contrastando su veracidad, organizándose y evaluándola críticamente, para resolver preguntas relacionadas con las ciencias biológicas y geológicas. Este proyecto requiere que el estudiantado busque, seleccione y evalúe críticamente información relevante sobre el río Tinto. A la vez que aprenden a discriminar entre fuentes confiables y menos fiables y a utilizar esta información para respaldar sus análisis y conclusiones.
- CE 3. Planificar y desarrollar proyectos de investigación, siguiendo los pasos de las metodologías científicas y cooperando, cuando sea necesario, para indagar en aspectos relacionados con las ciencias geológicas y biológicas. El alumnado aplica metodologías científicas para diseñar y llevar a cabo investigaciones detalladas sobre diversos aspectos del río, como su biodiversidad, composición química y cambios geológicos a lo largo del tiempo. Este trabajo incluye la planificación, ejecución y revisión de experimentos y estudios de campo.
- CE 4. Utilizar el razonamiento y el pensamiento computacional, analizando críticamente las respuestas y soluciones y reformulando el procedimiento, si fuera necesario, para resolver problemas o dar explicación a procesos de la vida cotidiana relacionados con la Biología y la Geología. En el análisis de datos y la modelización de procesos geológicos y biológicos, el alumnado utiliza el pensamiento computacional. Esto incluye la construcción del *hardware* y programación de *software* para la recogida y análisis de datos, así como la creación de modelos del río, y la simulación de impactos ambientales.
- CE 5. Analizar los efectos de determinadas acciones sobre el medioambiente y la salud, basándose en los fundamentos de las ciencias biológicas y de la Tierra, para promover y adoptar hábitos que eviten o minimicen los impactos medioambientales negativos, sean compatibles con un desarrollo sostenible y permitan mantener y mejorar la salud individual y colectiva, todo ello teniendo como marco el entorno andaluz. El alumnado investiga cómo las actividades humanas, como la minería y la agricultura, han afectado la biodiversidad y la calidad del agua del río Tinto. Proporcionan recomendaciones para mitigar impactos negativos, basándose en principios de sostenibilidad y conservación.

- CE 6. Analizar los elementos de un paisaje concreto valorándolo como patrimonio natural y utilizando conocimientos sobre geología y ciencias de la Tierra, para explicar su historia geológica, proponer acciones encaminadas a su protección e identificar posibles riesgos naturales: el proyecto permite al estudiantado valorar el río Tinto no solo como un sistema natural, sino también como un patrimonio cultural y natural. Asimismo, exploran su historia geológica y proponen medidas para su protección, considerando tanto su importancia ecológica como su relevancia cultural e histórica.

Por otro lado, se han adaptado los saberes básicos de la Orden del 30 de mayo de 2023 para el área de Biología y Geología. En concreto, se estableció una trama (figura 4) en la que se presentan, de forma relacionada los saberes de la secuencia y las competencias específicas –competencia específica 1 (señalada en color azul), competencia específica 2 (señalada en color verde), competencia específica 3 (señalada en color naranja), competencia específica 4 (señalada en color amarillo), competencia específica 5 (señalada en color rojo), competencia específica 6 (señalada en color morado)–.

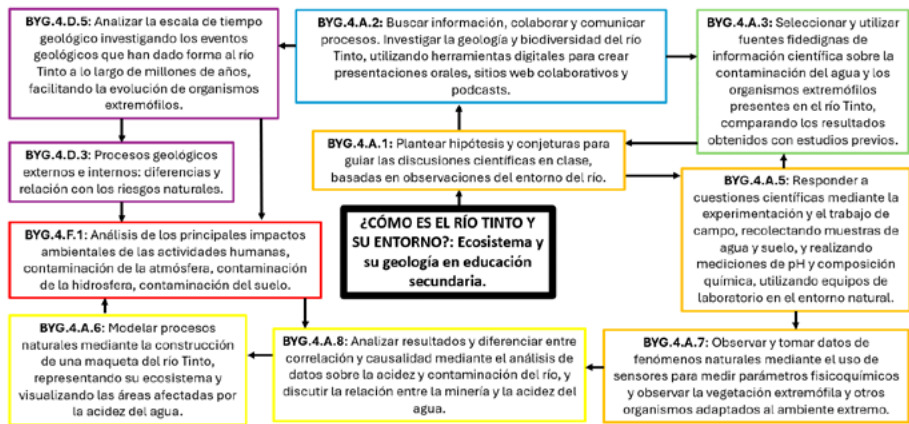


Figura 4. Trama de saberes básicos de la secuencia didáctica.

Fuente: elaboración propia a partir de los saberes básicos de la Orden del 30 de mayo de 2023.

Por tanto, para asegurar el conocimiento, la adquisición y el desarrollo de estos elementos curriculares, se han diseñado e implementado diez actividades (tabla 1) siguiendo las fases propias de las situaciones de aprendizaje.

Tabla 1. Actividades de la secuencia didáctica

Actividad	Fase de la situación de aprendizaje
Actividad 1: Lluvia de ideas sobre la importancia del río Tinto como ecosistema extremo y su biodiversidad única.	Motivación
Actividad 2: Planteamiento de preguntas de investigación por parte del alumnado guiadas por la discusión inicial y su curiosidad sobre el río.	Activación
Actividad 3: Análisis de la morfología y características geológicas del río Tinto usando <i>Google Maps</i> .	Exploración
Actividad 4: Investigación en clase sobre los organismos extremófilos y la vegetación única del río Tinto, como <i>Erica andevalensis</i> .	Exploración
Actividad 5: Salida de campo al río Tinto para observar directamente su morfología, tomar muestras y realizar mediciones fisicoquímicas con sensores.	Exploración
Actividad 6: Construcción de una maqueta de la cabecera del río Tinto, representando su distribución vegetal y las condiciones extremas que favorecen a <i>Erica andevalensis</i> .	Estructuración
Actividad 7: Desarrollo de un sitio web colaborativo que recopila toda la información obtenida durante el proyecto, incluyendo descripciones detalladas de la fauna y flora observadas.	Estructuración
Actividad 8: Debate sobre las implicaciones de conservar o restaurar el río Tinto, basado en la información recogida y los conocimientos adquiridos sobre su biodiversidad única.	Aplicación
Actividad 9: Presentación oral y discusión grupal sobre los hallazgos de la salida de campo y las implicaciones para la conservación del ecosistema del río Tinto.	Conclusión y Comunicación
Actividad 10: Realización de un <i>podcast</i> en el que relatan sus experiencias y aprendizajes sobre el ecosistema del río Tinto.	Conclusión y Comunicación

Fuente: elaboración propia

4.3. Instrumento de análisis y evaluación

La evaluación de esta secuencia didáctica se ha caracterizado por ser global, continua y formativa, siguiendo los principios establecidos en la Orden de 30 de mayo de 2023. Los aprendizajes adquiridos por el alumnado se evaluaron a partir de la observación de sus intervenciones en las actividades de clase, la calidad de sus producciones, así como su participación durante las fases de investigación y experimentación.

Se ha utilizado una rúbrica de evaluación que contempla los criterios de evaluación específicos de Biología y Geología, valorando las siguientes dimensiones: la capacidad para interpretar y representar datos sobre los fenómenos biológicos y geológicos del río Tinto; la planificación y desarrollo de experimentos en la salida de campo; el análisis crítico sobre el impacto de la actividad humana en el ecosistema; y el

uso adecuado de herramientas tecnológicas para la recogida y análisis de datos. Además, se valoraron las aportaciones del alumnado en las actividades grupales, como el desarrollo colaborativo de la maqueta del río y la creación del sitio web donde plasmaron sus investigaciones. La capacidad para integrar los conocimientos teóricos en contextos reales, y para participar activamente en los debates sobre la conservación o restauración del ecosistema del río, fue otro aspecto clave en la evaluación. Finalmente, para analizar los resultados de aprendizaje, se utilizó una rúbrica de evaluación que valora de forma progresiva la consecución de cada criterio de evaluación, desde un nivel inicial hasta uno deseable, tal y como se detalla en la siguiente tabla 2.

Tabla 2. Rúbrica de evaluación: instrumento de análisis de los resultados de aprendizaje

Criterios de evaluación	Indicadores de logro			
	Poco adecuado	Adecuado	Muy adecuado	Excelente
1.1. Analizar conceptos biológicos y geológicos utilizando diferentes formatos	No logra analizar ni representar los conceptos biológicos o geológicos de manera clara.	Representa de manera básica conceptos biológicos y geológicos, pero con errores o imprecisiones.	Analiza y representa adecuadamente los conceptos de ecología y geología del río Tinto, utilizando gráficos y modelos adecuados.	Realiza un análisis preciso, utilizando distintos formatos (mapas, gráficos, maquetas) para representar los datos de manera clara y estructurada.
1.2. Transmitir opiniones fundamentadas e información sobre Biología y Geología	No transmite información ni opiniones de forma clara ni fundamentada.	Transmite información y opiniones, aunque con escasa fundamentación y dificultad para estructurar los datos.	Transmite opiniones fundamentadas e información relevante sobre el ecosistema del río Tinto, utilizando el formato adecuado.	Comunica claramente sus análisis y opiniones, empleando datos precisos y una terminología científica rigurosa.
1.3. Analizar y representar fenómenos biológicos y geológicos utilizando modelos	No utiliza modelos ni herramientas para representar fenómenos biológicos o geológicos.	Representa algunos fenómenos con modelos simples, pero sin una comprensión clara de los procesos.	Utiliza adecuadamente modelos físicos o digitales para representar fenómenos biológicos y geológicos, como el flujo del río y su acidez.	Crea modelos precisos que muestran cómo interactúan los organismos y el entorno, representando fielmente los procesos observados.
2.1. Localizar, seleccionar y analizar información sobre Biología y Geología	No localiza ni selecciona fuentes de información adecuadas.	Localiza y selecciona fuentes, pero con dificultades para analizarlas críticamente.	Localiza, selecciona y analiza información científica relevante sobre el ecosistema del río Tinto, distinguiendo entre fuentes confiables y no confiables.	Realiza una búsqueda exhaustiva, seleccionando fuentes científicas rigurosas y analizando de manera detallada los datos obtenidos.

Criterios de evaluación	Indicadores de logro			
	Poco adecuado	Adecuado	Muy adecuado	Excelente
2.2. Contrastar la veracidad de la información y adoptar una actitud crítica	No logra contrastar la veracidad de la información científica.	Contrasta de forma limitada la veracidad de la información, aunque con algunas imprecisiones.	Contrasta adecuadamente la información sobre el ecosistema del río, detectando teorías no fundamentadas y bulos.	Muestra pensamiento crítico, contrastando rigurosamente la información y desmontando teorías infundadas.
3.1. Plantear preguntas e hipótesis sobre la acidez del río Tinto y sus impactos	No formula preguntas ni hipótesis claras sobre los fenómenos del río.	Plantea preguntas e hipótesis simples sobre la acidez del río y su biodiversidad.	Formula preguntas e hipótesis que exploran adecuadamente la relación entre la acidez del río y su biodiversidad extremófila.	Formula preguntas e hipótesis originales y avanzadas, mostrando un enfoque crítico hacia los impactos humanos y biológicos.
3.2. Diseñar la experimentación y la toma de datos para analizar fenómenos del río Tinto	No diseña adecuadamente la toma de datos ni la experimentación.	Diseña experimentos básicos, pero con limitaciones en la recogida de datos.	Diseña correctamente experimentos y procesos de toma de datos para analizar el ecosistema del río, utilizando sensores y otros instrumentos.	Diseña experimentos rigurosos, optimizando la precisión en la toma de datos y evitando sesgos en el análisis.
3.4. Interpretar y analizar resultados obtenidos sobre el ecosistema del río Tinto	No logra interpretar ni analizar los resultados de los experimentos realizados.	Interpreta los resultados, pero con una comprensión limitada de los datos.	Analiza adecuadamente los resultados obtenidos sobre el pH y la biodiversidad del río, utilizando herramientas matemáticas y tecnológicas.	Realiza un análisis detallado, obteniendo conclusiones bien fundamentadas sobre la relación entre los parámetros fisicoquímicos y la biodiversidad del río.
4.1. Resolver problemas biológicos o geológicos del río Tinto mediante el análisis de datos	No utiliza correctamente los datos ni herramientas, ni comprende la relación entre los parámetros fisicoquímicos y los procesos biológicos o geológicos.	Utiliza algunos datos y herramientas, pero con una comprensión limitada de cómo los parámetros afectan a los procesos biológicos y geológicos.	Utiliza adecuadamente los datos y herramientas tecnológicas para analizar los parámetros del río, mostrando una buena comprensión de la relación entre el pH, la composición química y los organismos del ecosistema.	Analiza con profundidad los datos recolectados, identificando relaciones complejas entre los parámetros fisicoquímicos y los procesos biológicos y geológicos.
5.1. Analizar los impactos de la actividad humana en el ecosistema del río Tinto	No logra identificar los impactos de la actividad humana en el ecosistema.	Reconoce algunos impactos de la actividad humana, pero sin comprender totalmente sus consecuencias.	Analiza adecuadamente los efectos de la actividad minera y otras acciones humanas en la biodiversidad y la calidad del agua del río Tinto.	Realiza un análisis crítico de los impactos humanos, proponiendo soluciones científicas y sostenibles.

6. «¿Cómo es el río Tinto y su entorno?».

Criterios de evaluación	Indicadores de logro			
	Poco adecuado	Adecuado	Muy adecuado	Excelente
6.2. Analizar el paisaje del río Tinto, valorando su importancia como patrimonio natural y científico controversial	No logra analizar el paisaje ni comprender su importancia como patrimonio controversial.	Realiza un análisis básico del paisaje, reconociendo algunos aspectos de su valor natural.	Analiza adecuadamente el paisaje del río Tinto, valorando su importancia como un patrimonio natural y científico controversial.	Analiza en profundidad el paisaje, proponiendo medidas para su conservación como patrimonio natural y científico controversial.

Fuente: elaboración propia a partir de los criterios de evaluación de la Orden de 30 de mayo de 2023

Por otro lado, se presenta un segundo instrumento teórico-metodológico de análisis (tabla 3) que evalúa la profundidad de las nociones que el alumnado presenta sobre la interacción del ser humano con el medio, el río Tinto y su entorno, así como los aspectos biológicos y geológicos trabajados a lo largo de la secuencia.

Tabla 3. Sistema de categorías: instrumento teórico y metodológico de análisis de la situación de aprendizaje

	Subcategoría	Indicadores	Descriptorios
I. ASPECTOS BIOGEOLOGICOS	1. Ecosistema del río Tinto	Explorador de ecosistemas	Reconoce las principales características del ecosistema del río Tinto, identificando flora y fauna extremófila.
		Investigador de la biota	Relaciona las características del ecosistema con la biota del río, explicando cómo los factores abióticos influyen en la biota.
		Ecólogo del Tinto	Analiza las interacciones ecológicas entre el biotopo y la biota, interpretando cómo las condiciones extremas afectan la biodiversidad.
	2. Suelo y Geología	Iniciado en Geología	Reconoce la composición básica del suelo y la geología de la zona, identificando suelos y rocas presentes en las márgenes del río.
		Geólogo de campo	Relaciona la composición geológica con los procesos químicos, explicando cómo los minerales del suelo influyen en la acidez del agua.
		Geólogo experto	Interpreta los procesos geológicos, explicando cómo estos afectan la erosión, sedimentación y el paisaje de la cuenca del río.

	Subcategoría	Indicadores	Descriptor
I. ASPECTOS BIOGEOLOGICOS	3. Flora y fauna extremófila	Observador de vida extrema	Identifica organismos extremófilos presentes en el río Tinto, como <i>Erica andevalensis</i> y otros organismos adaptados.
		Investigador de extremófilos	Explica la adaptación de los organismos a las condiciones extremas del río, relacionando la acidez del agua con la biota.
		Experto de entornos extremos	Analiza las adaptaciones biológicas en profundidad, explicando cómo la biota extremófila interactúa con su entorno.
	4. Geomorfología y modelado	Iniciado en modelado	Reconoce las principales características geomorfológicas del río, identificando la erosión y sedimentación en sus márgenes.
		Modelador geomorfológico	Relaciona la geomorfología del río con los procesos de erosión y sedimentación, explicando cómo afectan al paisaje.
		Experto geomorfológico	Interpreta los procesos geomorfológicos y su impacto en el paisaje, analizando los cambios a lo largo del tiempo.
II. INTERACCIÓN SER HUMANO-MEDIO	5. Impacto del ser humano en el río Tinto y su entorno	Observador histórico	Reconoce los principales eventos históricos relacionados con la minería y su influencia en el río.
		Intérprete de consecuencias	Analiza las consecuencias medioambientales y sociales de la actividad minera en el ecosistema del río Tinto.
		Crítico del equilibrio ecosistémico	Evalúa críticamente el impacto global de la minería y otras intervenciones humanas en el ecosistema del río, proponiendo soluciones.

Fuente: elaboración propia

5. Análisis y discusión

El desarrollo de esta situación de aprendizaje se centra en contenidos del área de Biología y Geología, combinada con la indagación científica y el enfoque crítico sobre la conservación del patrimonio ambiental. El alumnado ha sido capaz de aplicar conceptos teóricos y científicos a situaciones reales, como el análisis del río Tinto, un ecosistema controversial en el que confluyen factores naturales y antrópicos. Este enfoque coincide con los estudios de Koundouri *et al.* (2017), quienes destacan la relevancia de comprender los ecosistemas fluviales desde una perspectiva holística, integrando el impacto humano y los procesos naturales.

Además, la modelización y el uso del pensamiento computacional en la toma de datos físicos y químicos (Campina-López *et al.*, 2023)

han fomentado el desarrollo en el alumnado de competencias digitales y de habilidades para la resolución de problemas complejos. A su vez, el diseño y la creación de modelos sirvió en gran medida para la representación del impacto de las escombreras como foco fundamental de la situación actual del río. Dichos modelos, junto al uso de sensores programados, proporcionaron una plataforma para que el alumnado vinculara el aprendizaje de conceptos abstractos de ciencias, como el *pH* y los procesos que contribuyen a la acidez del medio, a realidades tangibles.

Por otro lado, es importante destacar que la controversia científica sobre la causa de la acidez del río aportó al alumnado la oportunidad de analizar puntos de vista opuestos sobre el impacto de la actividad minera y biológica. Esta discusión científica, aplicada en el aula, permitió a los estudiantes no solo comprender la complejidad del ecosistema del río Tinto, sino también involucrarse en debates sobre la restauración y conservación, alineándose con los ODS que promueven la preservación del medioambiente.

6. Conclusiones

La secuencia didáctica diseñada para dar respuesta a la subpregunta de investigación: «¿Cómo es el río Tinto y su entorno?» ha permitido al alumnado no solo adquirir conocimientos sobre Biología y Geología, sino también desarrollar un pensamiento crítico en torno a problemas sociocientíficos ligados a patrimonios, tal y como ya indicaban Cuenca (2014) y Estepa (2024). En concreto, el uso de herramientas tecnológicas, la experimentación práctica, y el debate basado en evidencias científicas han sido clave para que internalicen el conocimiento científico de manera aplicada y contextualizada.

La capacidad del alumnado para formular y dar respuesta a las preguntas planteadas a lo largo del proyecto pone de manifiesto el potencial de metodologías de indagación, fomentando un aprendizaje más autónomo y participativo, permitiendo que el alumnado se involucrara en su propio proceso de aprendizaje.

Por otro lado, a raíz de los resultados que ofreció el debate, así como las actividades de aula y de campo realizadas, se puede considerar que el alumnado logró conectar conceptos abstractos como el *pH* y la *acidez* con el impacto en la biodiversidad y la calidad del agua. Asimismo, la combinación de actividades de campo (figura 5), análisis de datos y el desarrollo de una metodología basada en la modelización a través de su ciclo permitió una comprensión profunda del ecosistema del río Tinto y su importancia tanto científica como social y económica.

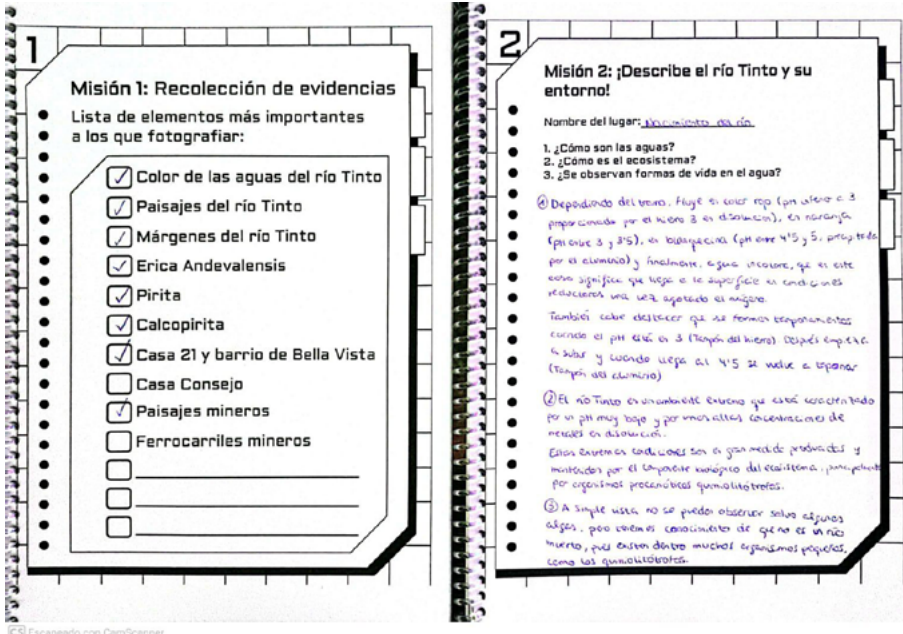


Figura 5. Imágenes de algunos de los cuadernos de campo del alumnado.

Fuente: elaboración propia.

Por tanto, este proyecto fomentaría una visión integral del aprendizaje, alineada con los principios de la educación científica interdisciplinar y los ODS, promoviendo en el alumnado no solo la adquisición de conocimientos, sino también la capacidad de tomar decisiones informadas sobre problemas ambientales contemporáneos.

7. Referencias

- Allan, J. D., Castillo, M. M. y Capps, K. A. (2021). *Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-61286-3>
- Arroyo, E., Sampedro-Martín, S., Martín-Cáceres, M. J. y Cuenca-López, J. M. (2022). Controversial Heritage, Ecosocial Education and Citizenship. Connections for the Development of Heritage Education in Formal Education. En: D. Ortega-Sánchez (ed.). *Controversial Issues and Social Problems for an Integrated Disciplinary Teaching* (pp. 35-52). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08697-7_4

- Cabrera Castillo, H. y Ortiz, L. (2022). *Tendencias de investigaciones educativas entre 2016-2021 realizadas en la escuela secundaria sobre el tópico Ecosistemas. Enseñanza de las Ciencias* (pp. 124-133). Universidad de Alcalá.
- Campina-López, A., Marín, A. A. L. y Pérez, M. Á. de las H. (2023). Análisis para la implementación conjunta de metodologías para el desarrollo de la investigación y la resolución de problemas en las aulas de ciencias. *Ápice. Revista de Educación Científica*, 7(1), art. 1. <https://doi.org/10.17979/arec.2023.7.1.9493>
- Córdoba García, F. (2022). Las bacterias extremófilas de los ríos ácidos de Huelva. *Biología de Huelva: Naturaleza, Biodiversidad, Bioindicadores y Biomarcadores* (pp. 17-50). Universidad de Huelva. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8574433>
- Couso, D., Jiménez-Liso, M. R., Refojo, C. y Sacristán, J. A. (2020, 5 de marzo). *Enseñando ciencia con ciencia*. FECYT. <https://www.fecyt.es/es/publicacion/ensenando-ciencia-con-ciencia>
- Cuenca López, J. M. (2014). El papel del patrimonio en los centros educativos: Hacia la socialización patrimonial. *Tejuelo: Didáctica de la Lengua y la Literatura. Educación*, 19, 76-96. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4725269>
- De la Vega Zamorano, E. e Iranzo García, E. (2021). El patrimonio y paisaje del agua de l'Horta Sud como recursos para una propuesta didáctica. *Cuadernos Geográficos*, 60(2), art. 2. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v60i2.15950>
- Decreto 558/2004, de 14 de diciembre, por el que se declara el Paisaje Protegido de Río Tinto. *Boletín oficial de la Junta de Andalucía*, 10, de 10 de enero de 2005. <https://www.juntadeandalucia.es/boja/2005/10/2>
- Díez López, J. R., Rúa, D., Barrutia Sarasua, O. y Ortega Lasuen, U. (2024). Concepciones del profesorado y alumnado de Secundaria sobre los ecosistemas fluviales y su gestión. *31 Encuentros Internacionales de Didáctica de las Ciencias Experimentales: Hacia una educación científica alineada con la Agenda 2030, 2024* (pp. 517-523). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9697922>
- Estepa, J. (2024). Educar en memoria histórica y democrática a través de la educación patrimonial: El antipatrimonio. *REIDICS. Revista de Investigación en Didáctica de las Ciencias Sociales*, 14, art. 14. <https://doi.org/10.17398/2531-0968.14.01>
- Gómez-Ortiz, D., Fernández-Remolar, D. C., Granda, Á., Quesada, C., Granda, T., Prieto-Ballesteros, O., Molina, A. y Amils, R. (2014). Identification of the subsurface sulfide bodies responsible for acidity in Río Tinto source water, Spain. *Earth and Planetary Science Letters*, 391, 36-41. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.01.022>

- Koundouri, P., Boulton, A. J., Datry, T. y Souliotis, I. (2017). Chapter 5.2– Ecosystem Services, Values, and Societal Perceptions of Intermittent Rivers and Ephemeral Streams. En: T. Datry, N. Bonada y A. Boulton (eds.). *Intermittent Rivers and Ephemeral Streams* (pp. 455-476). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803835-2.00018-8>
- Martínez-Suárez, D. G. (2022). Pensamiento científico en la educación secundaria: Acercamiento al estado de la cuestión. *Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad*, 14(27). <https://www.redalyc.org/journal/5343/534371259005/html/>
- Nudelman, N. S. (2015). Educación en ciencias basada en la indagación. *CTS: Revista iberoamericana de ciencia, tecnología y sociedad*, 10(28), 11-22. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5130049>
- Olías, M. y Nieto, J. M. (2015). Background Conditions and Mining Pollution throughout History in the Río Tinto (SW Spain). *Enviroments*, 2, 295-316. <https://doi.org/10.3390/environments2030295>
- Olías, M. y Nieto, J. M. (2012). El impacto de la minería en los ríos Tinto y Odiel a lo largo de la Historia. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 25(3-4), 177-192.
- Orden de 30 de mayo de 2023, por la que se desarrolla el currículo correspondiente a la etapa de Educación Secundaria Obligatoria en la Comunidad Autónoma de Andalucía. *Boletín Oficial de la Junta de Andalucía*, 104, de 2 de junio de 2023. <https://www.juntadeandalucia.es/boja/2023/104/36>.
- 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, de 30 de marzo de 2022. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/03/29/217/con>
- Sánchez-García, L., Fernández-Martínez, M. A., Moreno-Paz, M., Carrizo, D., García-Villadangos, M., Manchado, J. M., Stoker, C. R., Glass, B. y Párrro, V. (2020). Simulating Mars Drilling Mission for Searching for Life: *Ground-Truthing* Lipids and Other Complex Microbial Biomarkers in the Iron-Sulfur Rich Río Tinto Analog. *Astrobiology*, 20(9), 1029-1047. <https://doi.org/10.1089/ast.2019.2101>
- Soysal, Y. (2021). Talking Science: Argument-Based Inquiry, Teachers' Talk Moves, and Students' Critical Thinking in the Classroom. *Science & Education*. <https://doi.org/10.1007/s11191-020-00163-1>
- Trabajo, M. y Cuenca, J. M. (2022). Educación patrimonial y sostenibilidad: un estudio de caso en enseñanza secundaria obligatoria. *Educação & Sociedade*, 43, e255220. <https://doi.org/10.1590/ES.255220>
- Vázquez Alonso, Á. y Manassero Mas, M. A. (2018). Más allá de la comprensión científica: Educación científica para desarrollar el pensamiento. *REEC: Revista electrónica de enseñanza de las ciencias*, 17(2), 309-336. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6449623>

8. Agradecimientos

Este estudio forma parte del proyecto «La controversia sociocientífica del Río Tinto como recurso para la generación de identidad en los estudiantes: ¿Conservar o restaurar?», aprobado en la convocatoria 2022/2023 para proyectos de innovación docente e investigación educativa de la Universidad de Huelva. Así es parte del proyecto I+D+i «Patrimonios controversiales para la formación ecosocial de la ciudadanía. Una investigación de educación patrimonial en la enseñanza reglada (EPITEC2)» (PID2020-116662GB-I00), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033, y del proyecto I+D+i «Conocimiento especializado en la formación del profesorado de matemáticas, ciencias experimentales y ciencias sociales (MTSK-STSK-SCTSK)» (ProyExcel_00297), de la convocatoria de subvenciones a proyectos I+D+i universidades y entidades públicas de investigación 2021 de la Junta de Andalucía, y se enmarca en el Centro de Investigación en Pensamiento Contemporáneo e Innovación para el Desarrollo Social (COIDESO) y del grupo DESYM (HUM-168) de la Universidad de Huelva.

Por último, queríamos agradecer encarecidamente al equipo docente del colegio concertado María Auxiliadora de Valverde del Camino y a todos los coordinadores de este proyecto.

