



Aquaroca, un proyecto acuapónico para el estudio del catabolismo

Manuel Rodas¹, Alberto Muñoz² y Javier Cubero³

¹IES Extremadura, Montijo (Badajoz), España

²Dpto. de Didáctica de Ciencias Experimentales, Sociales y Matemáticas, Facultad de Educación, Universidad Complutense de Madrid, España

³Dpto. Didáctica de Ciencias Experimentales y Matemáticas, Facultad de Educación y Psicología, UEX, Badajoz, España

[Recibido: 16 noviembre 2024; Revisado: 21 noviembre 2024; Aceptado: 07 enero 2026]

Resumen: El proyecto AQUAROCA fue implementado para mejorar el proceso de aprendizaje del metabolismo en el bachillerato, mediante la fabricación y empleo de un sistema acuapónico. Se ha recurrido a una metodología de investigación basada en un diseño cuasi-experimental y transversal. Se realizó un estudio comparativo del aprendizaje de los conceptos de respiración celular y fermentación utilizando la metodología tradicional y Aquaroca, partiendo de la misma base teórica y siendo expuesta por el mismo docente, siendo los datos analizados mediante una metodología de tipo mixta (Cuali-Cuantitativa). Los resultados de la investigación han confirmado la hipótesis de trabajo inicial y por tanto que el alumnado del grupo Aquaroca presenta unos aprendizajes más significativos que los del grupo Control lo que indica la bondad del proyecto y sugiere su uso para el aprendizaje de otros conceptos metabólicos complejos.

Palabras clave: acuaponía; respiración celular; fermentación; bachillerato.

Aquaroca: using aquaponics to teach catabolism

Abstract: This article reports on the implementation of the Aquaroca teaching project in a high school classroom with the aim of improving student learning about metabolism through the construction and use of an aquaponic system. The research methodology was based on a comparative, quasi-experimental, cross-sectional design. The aim of the study was to assess and compare student learning of the concepts of cellular respiration and fermentation using a traditional teaching methodology and the Aquaroca project. Both groups of students were taught by the same teacher and received the same theoretical content. The data were analysed using a mixed methodology. The results confirm the initial working hypothesis that students in the Aquaroca group would show more significant learning outcomes than those in the control group, and support the project's extension as a teaching and learning approach to other complex metabolic concepts.

Keywords: aquaponics; cellular respiration; fermentation; high school.

Introducción

Todos los seres vivos llevamos a cabo una serie de funciones para las que necesitamos un aporte continuo de energía libre (Berg et al., 2008). Esta energía se obtiene mediante procesos metabólicos que implican a una batería de reacciones químicas muy ordenadas catalizadas por numerosas enzimas, que tienen lugar en diversos lugares de la célula.

La enseñanza de estos procesos es de vital importancia para la comprensión de la diversidad de seres vivos, su fisiología, así como sus nichos ecológicos. Así, este tema se recoge en el currículo de Bachillerato en los bloques de ecología, fisiología y microorganismos (Real Decreto 243/2022).

Dentro de los procesos metabólicos que generan energía, el más importante es sin duda la respiración celular, que en general podemos definir como proceso de obtención de energía que implica la oxidación completa de la materia orgánica a CO₂ y H₂O, siendo el último aceptor de electrones una molécula inorgánica. Alumnos tanto universitarios como pre-universitarios, encuentran graves dificultades para el aprendizaje significativo del catabolismo. Songer y Mintzes, (1994) realizaron un estudio con alumnos universitarios de Biología en el que, mediante mapas conceptuales y entrevistas personales, encontraron graves errores conceptuales en el aprendizaje de la respiración celular, principalmente en el papel que juega el oxígeno.

Dada la cantidad de procesos bioquímicos y fisiológicos involucrados en la comprensión del metabolismo, es evidente que la enseñanza de la respiración celular supone un gran reto para los docentes, y que las metodologías tradicionales no son capaces de generar unos aprendizajes significativos; por ello su docencia se ha tratado de abordar desde diferentes puntos de vista. Una de las formas tradicionales en la que se ha enfocado ha sido a través de analogías entre el proceso metabólico y un modelo de combustión química; para Pégola y Galagovsky, (2020) este tipo de analogías, que excluyen una discusión epistemológica de sus alcances y limitaciones, generan errores en el aprendizaje. Por su parte, Çakir et al. (2002), tras analizar errores conceptuales de alumnos de secundaria para la respiración celular, proponen centrar el estudio en dichos errores. Otros autores (Garófalo et al., 2014), que estudiaron diferentes tipos de modelos, proponen cambios en los criterios de selección de contenidos y en las metodologías aplicadas. Estos estudios sugieren que se hace necesario un cambio profundo en la enseñanza de la respiración celular, empleando metodologías que motiven al alumnado, que consideren los diferentes estilos de aprendizaje, que introduzcan el aprendizaje autónomo e involucren al alumnado en un proceso de aprendizaje cooperativo (Salinas, 2020).

El concepto de fermentación es aún más complejo si cabe que el de respiración celular. En su acepción puramente bioquímica se puede definir como aquel proceso catabólico anaerobio alternativo a la respiración celular que sucede en el citoplasma y que implica la oxidación parcial de la materia orgánica, generando productos residuales muy energéticos aún, como el etanol o el ácido láctico. Este proceso es llevado a cabo por microorganismos que no toleran el oxígeno o por ciertas eucariotas (levaduras, células musculares o células vegetales) cuando no disponen de suficiente oxígeno. Esta complejidad se puede ver potenciada por la polisemia del término, que puede hacer referencia a cuatro tipos de procesos diferentes: (1) el metabolismo en ausencia de oxígeno, (2) la producción de metabolitos secundarios, (3) la modificación de compuestos químicos por microorganismos y (4) el crecimiento bacteriano en sí (Berg et al., 2008).

A pesar, de las múltiples vías que nos acercan el concepto de fermentación o quizás debido a ellas, actualmente, su representación mental en los estudiantes dista mucho de ser la idónea (Muñoz et al., 2018). Así, por ejemplo, un estudio realizado con alumnos

de bachillerato que cursaban la materia de Biología señalaba que el 60% desconocían el concepto o presentaban numerosos errores conceptuales (Salinas, 2020).

Para dar solución a este problema de conocimiento sobre la fermentación, algunos autores proponen un aprendizaje basado en la indagación, ya que los conceptos científicos se aprenderán mejor haciendo Ciencia (Lederman et al., 2013), de tal manera que, mediante el diseño y realización de prácticas de fermentación, el alumnado adquiera y profundice en los procesos fermentativos (Ho Chan et al., 2021). Lo cual será percibido como innovador por el alumnado, aumentando su motivación y favoreciendo el proceso de enseñanza-aprendizaje (Muñoz et al., 2020).

Acuaponía

La acuaponía es una actividad que combina la acuicultura y la hidroponía en un mismo sistema integrado y sostenible (Figura 1), definiéndose como aquel sistema de producción de alimentos que incluye la incorporación de dos o más componentes en un diseño basado en la recirculación de agua, en el que los excesos de alimento de los peces, así como sus productos de excreción son transformados en nutrientes gracias a la acción de bacterias nitrificantes y absorbidos por las plantas cultivadas hidropónicamente (Rakocy et al., 2010).

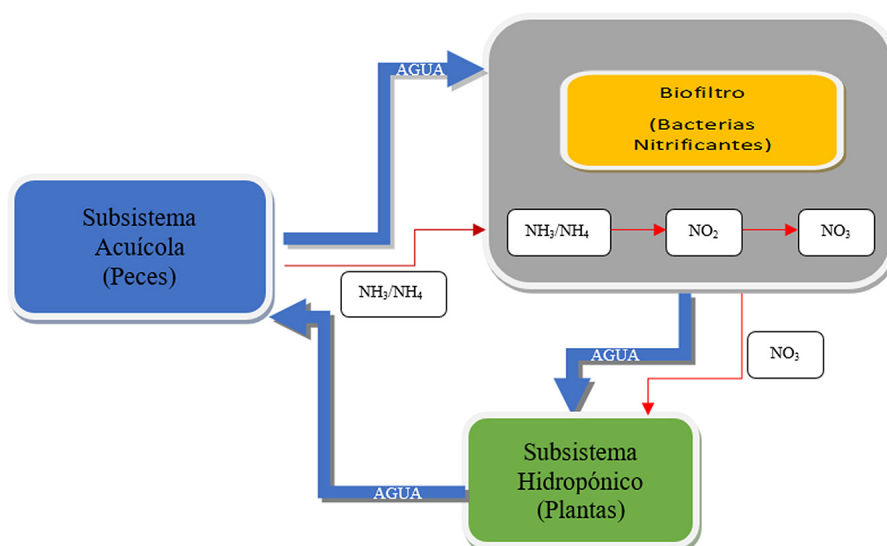


Figura 1. Esquema de un Sistema Acuapónico. Presenta dos subsistemas principales, en azul el acuícola donde se cultivan las especies piscícolas, en verde el hidropónico donde se cultivan las plantas. Se completan con un filtro biológico (gris) donde se produce el ciclo del Nitrógeno y la conversión de los compuestos amoniacales en nitratos mediante bacterias nitrificantes

Autores como Jiménez (2013) proponen que la acuaponía puede ser una herramienta de desarrollo para las ciencias en la Secundaria, pues ofrece un aprendizaje práctico y flexible, abordando conceptos STEM y fomenta sentimientos positivos hacia la metodología entre alumnos y docentes (Hart et al., 2013). Son estas bondades de la acuaponía las que inclinan a diversos autores a señalarla como una herramienta de gran valor didáctico en las clases de Biología, así como un recurso transversal donde experimentar la interdisciplinariedad, descubrir e interpretar la realidad y percibir la globalidad de la naturaleza en la que casi todo está relacionado y todo forma parte de todo (Scaglione et al., 2019).

En este trabajo se analiza el uso de la acuaponía como metodología didáctica para enseñar los conceptos de respiración celular y fermentación al alumnado de Bachillerato.

Metodología

AQUAROCA es un proyecto original y de diseño propio que consiste en la puesta en funcionamiento de un sistema acuapónico para la producción sostenible de plantas y peces, cuyo objetivo es integrar el aprendizaje de todos los procesos metabólicos dentro de un solo proyecto, aunque en este estudio solo tratemos los fenómenos catabólicos. AQUAROCA se implementó en un centro de secundaria para estudiantes de 1º de Bachillerato de Ciencias con el objetivo de analizar su efecto sobre el aprendizaje activo de los contenidos de Biología relacionados con la respiración celular y la fermentación.

Población de Estudio

El grupo de estudio fueron 40 estudiantes de 1º de Bachillerato del IES Sierra de San Pedro de la Roca de la Sierra (Badajoz) que cursaban la asignatura de Biología, de los cuales 19 eran de sexo femenino (47.5%) y 21 de sexo masculino (52.5%). El grupo de estudio fue dividido en dos subgrupos: El Grupo Control (GC), al que se le aplicó una metodología de enseñanza tradicional y el Grupo Aquaroca (GA) con los que se desarrolló el proyecto acuapónico AQUAROCA. El GC lo constituyeron 20 alumnos del curso 2017-2018 (10 chicas y 10 chicos) y el GA 20 alumnos del curso 2018-2019 (9 chicas y 11 chicos).

El Proyecto Aquaroca

El proyecto AQUAROCA fue desarrollado en varias fases, la primera consistió en el diseño y fabricación de un prototipo de laboratorio; posteriormente se fabricó el sistema acuapónico de campo, a lo que se le denominó Etapa Constructiva. Tras la puesta en funcionamiento de ambos sistemas y la medición de diferentes parámetros físico-químicos del agua, se procedió a la introducción de seres vivos en el siguiente orden: en primer lugar, bacterias, luego peces y finalmente plantas.

Para el funcionamiento correcto del sistema se requirió poner en marcha en paralelo otra serie de microproyectos (Etapa Auxiliar), como el cultivo de pulgas de agua (*Daphnia sp.*) y lombrices de tierra (*E. foetida*) como alimento suplementario de los peces; el cultivo y producción de algas y preparados de levaduras (*S. cerevisiae*) para el alimento de las Daphnias y la preparación de semilleros para cultivar las plántulas requeridas para el sistema acuapónico (Figura 2).

Etapa Constructiva	Diseño y Fabricación del Prototipo de Laboratorio	Puesta en funcionamiento. Ciclado
		Medición de parámetros del agua
	Fabricación del Sistema Acuapónico	Estudio del material bibliográfico
		Diseño y fabricación del Sistema de campo
Etapa Auxiliar	Procesos relacionados con la introducción de los Organismos del sistema	Puesta a punto. Mantenimiento
		Inoculación de Bacterias nitrificantes
		Preparación de Semilleros
		Introducción de Tencas (<i>Tinca tinca</i>)
	Producción de Seres Vivos	Plantado
		Algas (<i>Chlorophyceae</i>)
		Levaduras (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)
		Pulgas de agua (<i>Daphnia sp.</i>)
		Lombrices (<i>Eisenia foetida</i>)

Figura 2. Etapas de Aquaroca. En la columna de la izquierda se pueden distinguir las dos etapas del proyecto. En la columna central los subproyectos que se realizaron, y en la columna de la derecha las acciones que se llevaron a cabo

Diseño y Fabricación del prototipo de laboratorio

El prototipo fue diseñado y construido siguiendo las recomendaciones de la FAO (Somerville et al., 2014) para la fabricación de sistemas acuapónicos, pero adaptado a las circunstancias específicas de un laboratorio de un centro escolar. El sistema debía disponer de un recipiente estanco para los peces (Subsistema acuícola), otro para las plantas (Subsistema hidropónico) y un tercero para las bacterias (Biofiltro), tal y como se aprecia en la Figura 3.

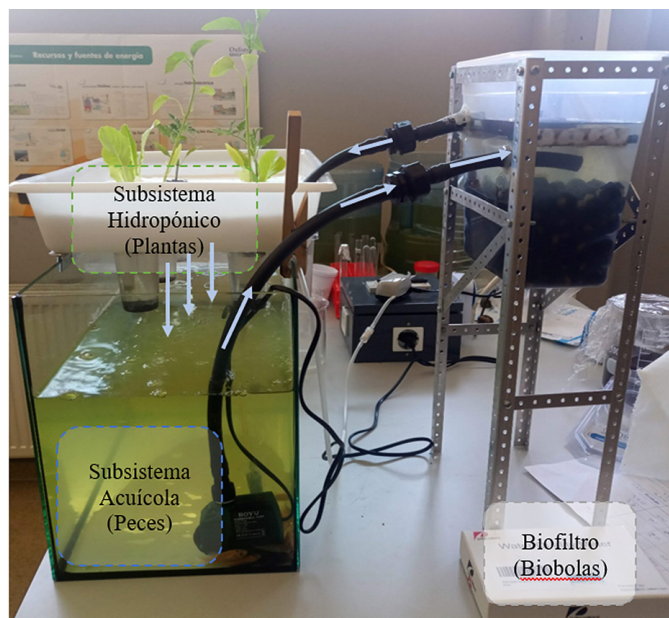


Figura 3. Prototipo. En la elaboración del mismo se mantiene la estructura de dos subsistemas unidos por un biofiltro, para favorecer el proceso didáctico. Las flechas indican el flujo del agua

Fabricación del Sistema Acuapónico

Tras analizar la bibliografía se decidió la construcción de un sistema de producción acuapónico a pequeña escala según las directrices de Somerville et al. (2014). Para el subsistema hidropónico se empleó la técnica de película de nutrientes NFT, descrita por Harmon (2003). Al igual que el prototipo, el sistema presentaba tres subsistemas (Figura 4).



Figura 4. Equipo acuapónico. 1. Tanque de peces. 2. Biofiltro. 3. Sistema hidropónico

Etapas Auxiliares

Previamente a la puesta en funcionamiento del sistema se procedió a la preparación y sembrado de semilleros y producción de alimento vivo (algas, pulgas de agua y lombrices). Una vez terminado, se inoculó una mezcla comercial de bacterias nitrificantes (Biodigest

Prodibio) en los dos sistemas acuapónicos y se procedió al ciclado de los mismos para que el nivel de bacterias fuera el adecuado antes de introducir los demás seres vivos. Al cabo de tres semanas se introdujeron las tencas (*T. tinca*), especie muy extendida y resistente a los cambios bruscos en la calidad de las aguas (Lobillo et al., 2014), lo que la hace óptima para el trabajo en los centros educativos. Finalmente se añadieron las plantas, empleándose especies ampliamente utilizadas en acuicultura como lechugas (*L. sativa*) o tomates (*S. lycopersicum*) (McMurtry et al., 1993), y otras no detalladas en la bibliografía como brócoli (*B. oleracea*), pimiento (*C. annuum*) y fresas (*Fragaria sp.*).

Dada la importancia de la presencia de las diferentes formas de Nitrógeno en agua para la supervivencia de los organismos, se llevó a cabo una analítica diaria desde el inicio de la ciclación mediante el empleo del Kit comercial de Análisis Multi Test 6 en 1, NT Labs NT170, que utiliza un método colorimétrico para medir amonio, nitrito y nitrato. Para las medidas de pH, turbidez y conductividad se recurrió a medidores digitales de la marca Elektorot.

Enseñanza Activa del Metabolismo con el Proyecto Acuapónico

El desarrollo didáctico del proceso, aunque es anterior a la actual ley educativa, se encuentra plenamente vigente dada su polivalencia, porque trabaja 6 de las 7 Competencias específicas de la materia de Biología, Geología y Ciencias Ambientales de 1º de Bachillerato, que a su vez presentan una clara relación con la competencia STEM (Decreto 109/2022). En cuanto a su arquitectura, el proceso se divide en tres fases: Teórica, Experimental y de Integración del conocimiento teórico y experimental. Estas dos últimas fases siguen las pautas que propone Caamaño (2007) para los trabajos prácticos de tipo investigativo.

La temporalización fue estructurada en siete clases, dos para la fase teórica, tres para la experimental y dos para la integración (Tabla 1).

Tabla 1. Estructura del proceso didáctico

Situación de aprendizaje: Energía en los seres vivos			
Fase	Competencias	Clases	Objetivo clase
Fase Teórica	CE1 y CE6	Citosol	Desarrollar los conceptos de glucólisis y fermentación
		Mitocondria	Desarrollar el concepto de Respiración Celular
Fase Experimental	CE3, CE4 y CE5	Preparación	Indagar conocimientos adquiridos Diseño experimental
		Experiencia1	Fermentación levaduras en presencia y ausencia de O ₂ Medidas de O ₂ disuelto (OD) con aumento de NH ₄ y de carga de peces
		Experiencia2	Obtención datos de OD, CO ₂ , NH ₄ y consumo de glúcidos Observación microscópica
Fase de Integración	CE1, CE2, CE4 y CE6	Resultados	Elaboración Informe
		Discusión	Presentación de resultados. Power Point, Canva, Prezzi...

Fase Teórica

La fase teórica la componen dos clases estructuradas en tres partes, un inicio donde se repasan los conceptos previos requeridos a través de una serie de preguntas de indagación, una parte central donde se desarrollan los conceptos objeto de estudio y un cierre donde se plantean una serie de preguntas en las que se evalúa si el alumnado ha comprendido los conceptos tratados. La primera clase denominada Citosol, tiene por objetivo dar a conocer las formas en que los seres vivos obtienen energía sin el concurso del oxígeno, y donde se desarrollan los conceptos de glucólisis y fermentación. La segunda clase denominada Mitocondria pretende dar a conocer la importancia del oxígeno en la obtención de energía, desarrollándose en ella el concepto de Respiración Celular Aerobia.

Fase Experimental

Está organizada en tres clases en el laboratorio, el objetivo es llevar a una situación real los conceptos trabajados en la fase teórica mediante el desarrollo de trabajos experimentales específicos dentro del proyecto. El alumnado se organiza en grupos de 4 estudiantes. En la primera clase denominada de preparación, se recuerda los conceptos previos de fermentación y respiración celular y se diseñan dos líneas experimentales una para cada concepto a trabajar, se plantean los protocolos a seguir y el material necesario.

En la segunda clase se preparan los experimentos y se ponen en marcha. En la tercera clase se recogen los resultados.

Fase de Integración

La actividad se desarrolló en dos sesiones e incluyó la elaboración de un informe de laboratorio y un abreviado presentación de resultados ante el resto de la clase. De este modo, cada grupo exponía a sus compañeros la explicación teórica que justificaba los resultados obtenidos. En el informe, el alumnado debía relacionar los fenómenos observados con el proceso metabólico estudiado y comprobar si los datos recogidos coincidían con las hipótesis formuladas en el planteamiento inicial de la práctica, basadas en las preguntas de indagación propuestas.

La principal diferencia entre el GC y el GA se produce en esta fase ya que mientras que en los experimentos de laboratorio que se hacen en las clases tradicionales termina aquí el proceso, el proyecto Aquaroca, al utilizar seres vivos, obliga al alumnado a cuidarlos durante todo el curso, lo que genera un efecto refuerzo en los procesos aprendidos, al tener que ir resolviendo situaciones que les demanda el ecosistema creado.

Instrumentos de recogida de datos para análisis cualitativo y cuantitativo

Se prepararon dos tipos de cuestionarios uno de preguntas abiertas y un segundo cuestionario de preguntas cerradas, desglosado en dos mini-cuestionarios, uno por cada concepto a estudiar: respiración celular (CR) y fermentación (CF).

El cuestionario empleado en el análisis cualitativo, estaban constituido por preguntas abiertas de tres tipos: preguntas en las que se les pedía una definición de los conceptos, preguntas sobre las relaciones que pudieran existir entre los diversos conceptos, y preguntas tipo supuesto práctico en las que, a través de situaciones cotidianas, se pretendía que hicieran una integración de los conceptos metabólicos en el mundo macroscópico (Figura 5).

Desarrolla lo más detalladamente que puedas las siguientes cuestiones

1. Cuando se dice que algo está fermentando ¿a qué nos referimos?
2. La fermentación ¿tendrá algo que ver con la respiración?
3. ¿Qué relación si es que existe alguna, encuentras entre estos dos conceptos?
Fermentación y Metabolismo
4. Supón que estás haciendo abdominales...
 - 4.1. ¿De qué proceso obtienen tus células musculares la energía?
 - 4.2. Al cabo de un rato, comienzas a notar pinchazos en el abdomen, ya que cada vez estás más fatigado ¿qué proceso está implicado?

Figura 5. Tipos de preguntas abiertas empleadas

Para el análisis cuantitativo se emplearon dos cuestionarios (CR y CF, Figura 6), basados en una escala de tipo Likert con 5 opciones que iban desde nada de acuerdo, a totalmente de acuerdo. Cada cuestionario contó inicialmente entre 30 y 35 preguntas desarrolladas por el equipo investigador.

La fermentación alcohólica y la fermentación láctica tienen en común la obtención de energía *
por degradación de glucosa, requiriendo oxígeno molecular.

1 2 3 4 5

Nada de acuerdo ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Totalmente de acuerdo

La fermentación es un proceso físico que implica un tratamiento térmico (aumento de la *
temperatura) y que ocurre en diferentes alimentos (vino, pan, etc.).

1 2 3 4 5

Nada de acuerdo ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Totalmente de acuerdo

...

El O₂ respirado lo utiliza la célula para obtener energía *

1 2 3 4 5

Nada de acuerdo ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Totalmente de acuerdo

Otra finalidad de la fosforilación oxidativa es aprovechar la energía que se desprende de las *
oxidaciones y reducciones para formar moléculas de ATP.

1 2 3 4 5

Nada de acuerdo ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Totalmente de acuerdo

Figura 6. Preguntas cerradas. Las dos primeras serían un ejemplo de las preguntas del cuestionario CF y las dos últimas del cuestionario CR

Tras el proceso de validación, se depuraron las cuestiones que inducían a error al alumnado, bien porque no eran entendidas por el mismo, bien porque su enunciado no era correcto. De tal modo que el CR quedó con 23 ítems, y 31 el CF.

Análisis Estadísticos

El análisis de los problemas de la enseñanza y aprendizaje del metabolismo se ha realizado con métodos mixtos, cuantitativos y cualitativos (Creswell, 2015).

Análisis cualitativo

Se empleó el software de análisis cualitativo WebQDA, que permite mayor fiabilidad en el análisis en las categorías cualitativas, así como una fácil importación de los datos recolectados, creación de categorías en una estructura de árbol (Figura 7), su codificación y la obtención de matrices de comparación entre los elementos estudiados (Souza et al., 2011), las cuales serían analizadas por estadística descriptiva e inferencial confirmando por tanto un análisis mixto de los resultados. Para el análisis de las tablas de contingencia obtenidas a partir de dichas matrices, se emplearon la prueba Chi-cuadrado de Pearson y la U de Mann-Whitney para muestras independientes. En todos los cuestionarios, para verificar la normalidad, se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk y se consideró estadísticamente significativo el valor de p inferior a .05.

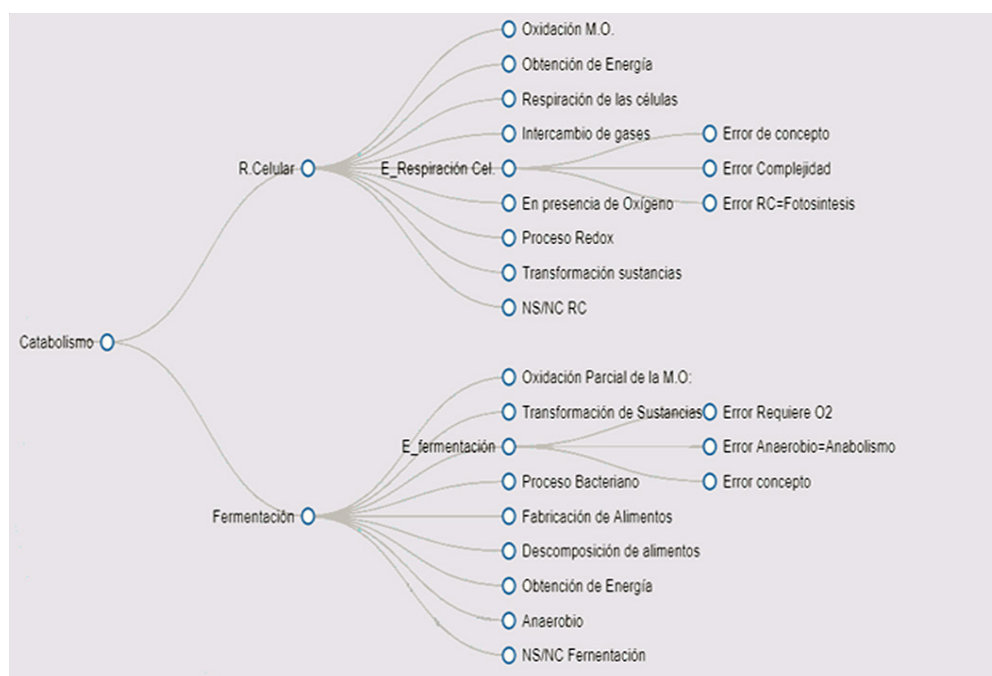


Figura 7. Diagrama de Árbol obtenido con WebQDA. Los códigos E_Respiración Cel y E_fermentación, recogen los errores inducidos por el proceso de enseñanza

Análisis cuantitativo

Los datos obtenidos de los cuestionarios con escala Likert (CR y CF), fueron analizados mediante SPSS (ver. 22.0). Se realizaron análisis descriptivo e inferencial, utilizando estadística paramétrica y no paramétrica, según las variables. La fiabilidad de los cuestionarios se estudió a través del alfa de Cronbach con un valor medio de alfa > 0.8. En el análisis estadístico inferencial se utilizó la prueba U de Mann-Whitney y para verificar la normalidad, la prueba de Shapiro-Wilk. Para facilitar el análisis de los datos, los puntajes obtenidos por el alumnado fueron agrupados en tres categorías: normales (valor promedio entre 2 y 3), buenos (valor promedio superior a 3 y hasta 4) y muy buenos (superior a 4). Los valores promedio se calcularon como la razón entre la puntuación total obtenida y el número de ítems evaluados.

Resultados

Para facilitar la comprensión de los resultados emanados de esta investigación se presentan en primer lugar los obtenidos para el concepto de Fermentación y luego para el de Respiración Celular. Para cada concepto, se presentan en primer término, los resultados derivados del análisis cualitativo del cuestionario abierto, mostrándose los códigos elaborados. Posteriormente se muestran los resultados del análisis de las tablas de contingencia. A continuación, los obtenidos del análisis cuantitativo del cuestionario de preguntas cerradas.

Fermentación

Del cuestionario de preguntas abiertas se puede inferir que el alumnado de ambos grupos define la fermentación como un proceso de oxidación parcial de la materia orgánica; sin embargo, mientras que los del GC ponen mayor énfasis en que se trata un proceso anaerobio, los del GA lo hacen en la finalidad del mismo y por tanto en la obtención de energía por parte del ser vivo (Figura 8). También se observa cómo una parte del alumnado del GC desconoce el proceso fermentativo.

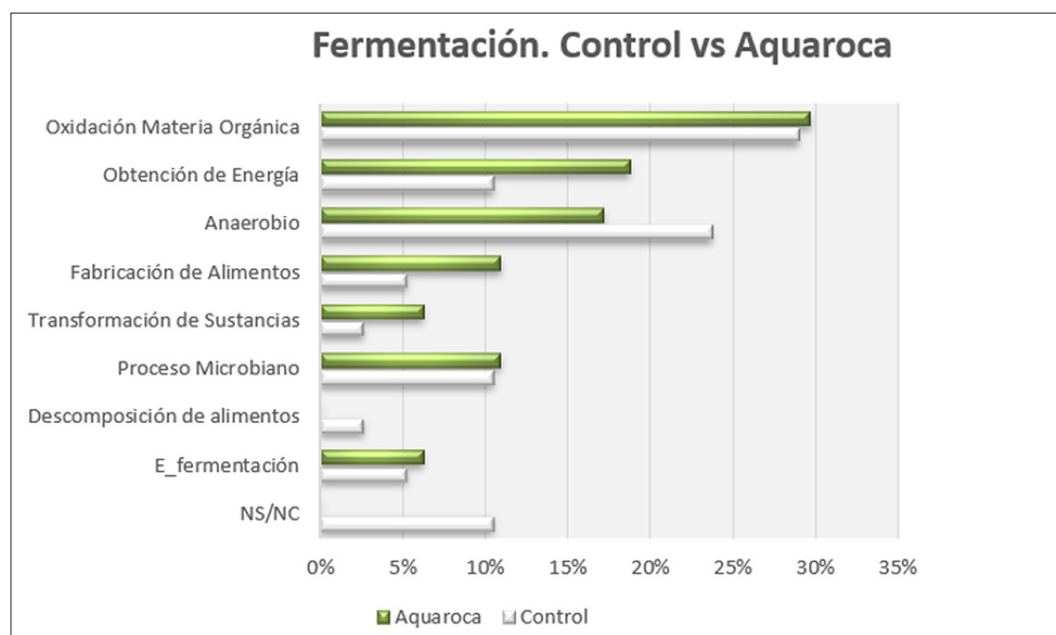


Figura 8. Códigos elaborados para las respuestas producidas por el alumnado para el concepto Fermentación. En el gráfico se recogen los porcentajes de las diferentes respuestas dadas por el alumno en los cuestionarios abiertos. En blanco se pueden apreciar las del GC y en verde las del GA

El GA obtiene más respuestas correctas que el GC para el concepto Fermentación ($\chi^2_{(3)} = 13.03$, $p = .01$). Por otro lado, la intensidad de la asociación entre las respuestas correctas del alumnado y la metodología empleada, es moderada (V de Cramer = 0.57, $p < 0.05$).

No solo el alumnado que recibió la metodología Aquaroca obtuvo más respuestas correctas, sino que además produjeron textos más ricos para la definición del concepto de fermentación (Mann-Whitney $U = 79$, $p < .01$, g de Hedges > 0.8 , ver Figura 9).

Los puntajes obtenidos para el cuestionario de preguntas cerradas por parte del alumnado del GA fueron notablemente mejores que los obtenidos por el GC (Mann-Whitney $U = 100$, $p < .01$, g de Hedges > 0.8 ; Figura 10).

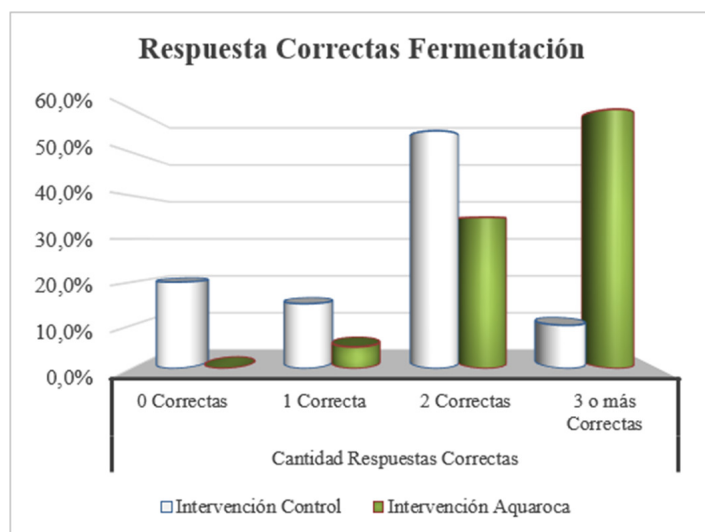


Figura 9. Cantidad de respuestas correctas que facilita el alumnado para el concepto fermentación. En blanco se aprecian las respuestas ofrecidas por el alumnado del GC y en verde por el GA

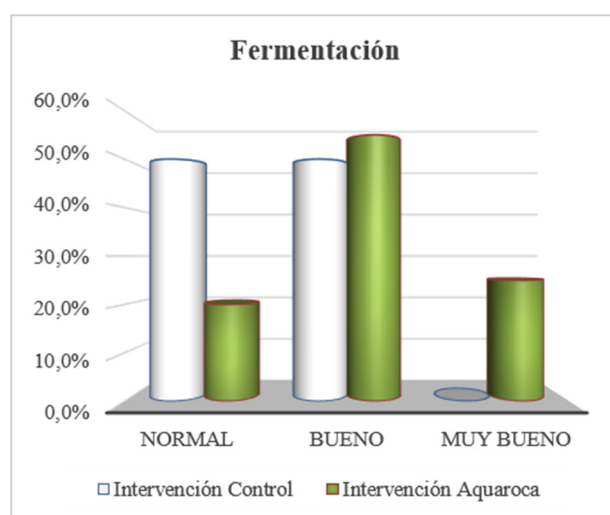


Figura 10. Resultados del cuestionario de Fermentación. Porcentaje de alumnos que obtienen puntajes normales, buenos o muy buenos. En blanco valores obtenidos para GC y en verde para GA

Todos los datos recogidos para el concepto de fermentación, tanto cualitativos como cuantitativos sugieren que el alumnado del GA obtiene mejores resultados que el GC.

Respiración celular

El cuestionario de preguntas abiertas señala que el alumnado del GA entiende que la Respiración Celular es un proceso que implica la oxidación de materia orgánica para obtener energía, en cambio, los del GC, aunque manifiestan que es un proceso de oxidación, no indican que es para la obtención de energía. Éstos además confunden el proceso que se produce a nivel mitocondrial que requiere oxígeno y la consecuente producción de CO₂, con el proceso de intercambio gaseoso que se produce a nivel pulmonar (Figura 11). Llama especialmente la atención que solo el alumnado del GA indica que la respiración es un proceso de obtención de energía.

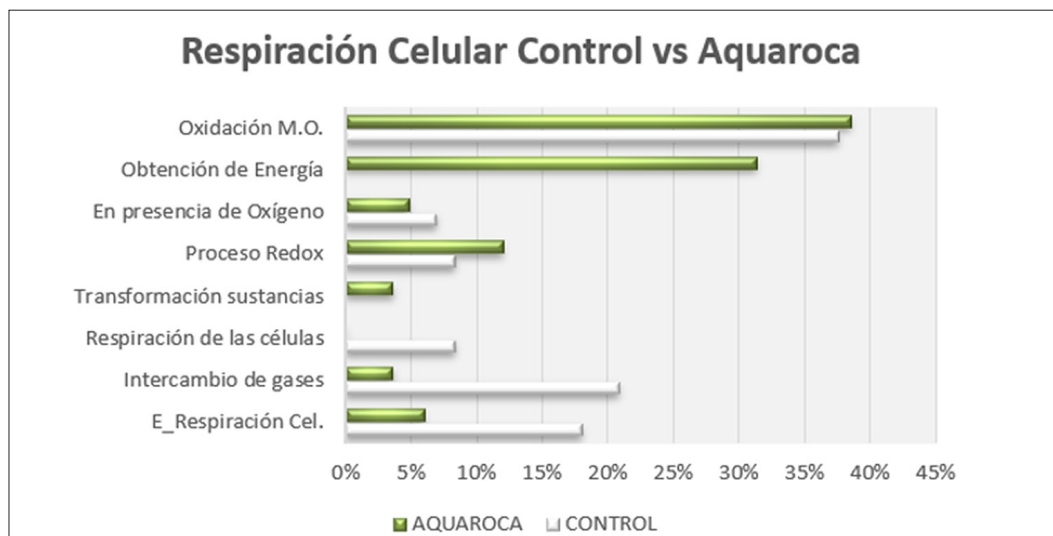


Figura 11. Respuestas al concepto de Respiración Celular. En el gráfico se recogen los porcentajes de las diferentes respuestas dadas por el alumnado. En blanco las respuestas del GC y en verde del GA

Se observa un efecto de la metodología empleada tanto para las respuestas correctas ($\chi^2_{(3)} = 12.56$, $p < .01$) como incorrectas ($\chi^2_{(3)} = 8.5$, $p = .01$), señalando que el alumnado que recibe la metodología Aquaroca consigue mejores resultados y comete menos errores. La intensidad de la asociación entre las respuestas correctas del alumnado y la intervención y por tanto la metodología empleada, es moderada (V de Cramer = 0.56, $p < .05$).

Dentro de las respuestas correctas (Figura 11) cabe mencionar la relacionada con la “Obtención de Energía”, en la cual existe asociación ($\chi^2_{(3)} = 19.26$, $p < .01$) y cuya intensidad es moderada-alta (V de Cramer = 0.69 y $p < .01$), lo que nos indica que el hecho de que el alumno señale que la obtención de energía es una finalidad de la respiración celular depende del uso de la metodología Aquaroca.

En la Figura 12 se muestran las respuestas correctas de ambos grupos, pudiéndose observar que los estudiantes del grupo Aquaroca no solo presentan un mayor número de respuestas correctas para el concepto de respiración celular, sino que las respuestas que ofrecen son más completas (Mann-Whitney $U = 81$, $p < .01$, g de Hedges > 1).

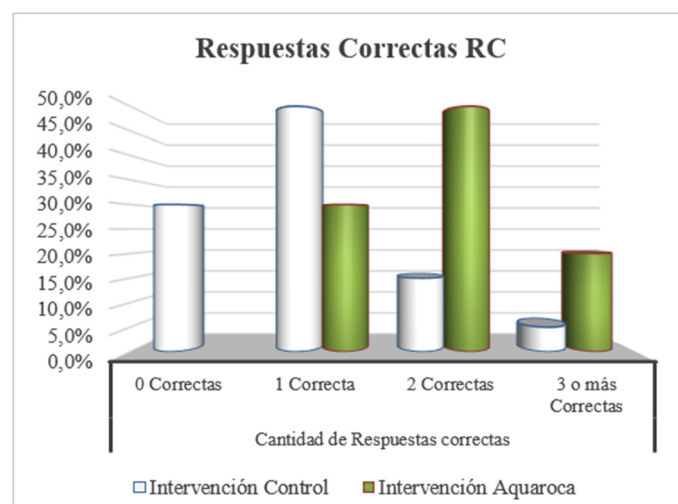


Figura 12. Respuestas Correctas para el concepto de Respiración Celular. Se recoge en blanco las respuestas correctas del GC y en verde las del GA

En los puntajes obtenidos para el cuestionario de preguntas cerradas por parte del alumnado del GA parece apreciarse una respuesta más positiva para el concepto de Respiración Celular que los obtenidos por el GC (Mann-Whitney U= 97.5, $p < .01$, g de Hedges > 1 ; Figura 13).

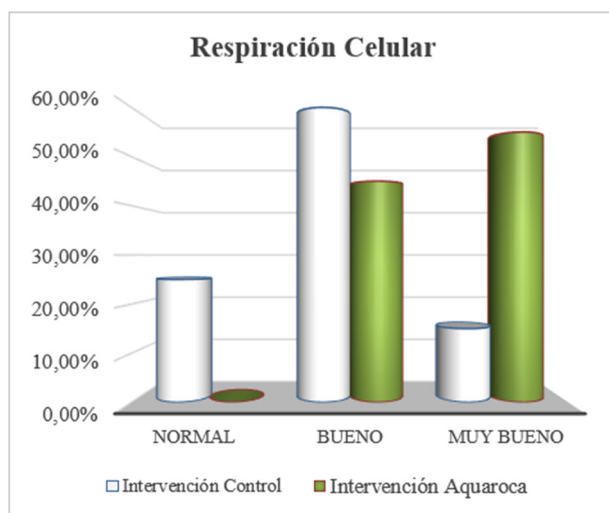


Figura 13. Resultados del cuestionario de Respiración Celular. Porcentaje de alumnos que obtienen puntajes normales, buenos o muy buenos. En blanco, valores obtenidos por el GC y en verde por GA

Como ocurre para el concepto de fermentación, tanto el cuestionario como el análisis de los textos indican que los alumnos del GA dan un mayor número de respuestas correctas para el concepto de respiración celular.

Discusión

El estudio del metabolismo resulta muy complejo y abstracto, generando la tendencia en los docentes de abordarlo desde una metodología tradicional y memorística, que en muchos casos ha producido rechazo por parte del alumnado (Charrier et al., 2006; Salinas, 2020). Pocos han sido los que han utilizado las prácticas de laboratorio en el proceso de aprendizaje y si así lo han hecho, no han tenido una línea conductora común que uniera los conceptos teóricos con dichas experiencias prácticas dentro de un marco macroscópico único (Muñoz et al., 2020). Esta necesidad de acercar el mundo microscópico al macroscópico llevó a plantear el proyecto acuapónico Aquaroca como modelo para el estudio del catabolismo, en cuyo ecosistema conviven individuos con metabolismos muy diferentes pero dependientes unos de otros.

En nuestra investigación, el proceso de indagación formó parte inseparable del proceso de aprendizaje. Otros trabajos señalan las bondades de este tipo de instrucción, porque favorece el aprendizaje de conceptos, permite la adquisición de destrezas para la resolución de problemas, estimula la creatividad y la motivación hacia las Ciencias (Russell y Weaver, 2011; Shana y Abulibdeh, 2020).

Por otro lado, el hecho de utilizar varios tipos de técnicas para el estudio de los resultados y utilizarlos de manera conjunta y complementaria, combinando el análisis cualitativo con el cuantitativo, aumenta la profundidad de comprensión que una investigación puede producir, ya que cada método revela facetas ligeramente diferentes de la misma realidad simbólica (Lune y Berg, 2017).

El análisis cualitativo de los cuestionarios reveló ideas alternativas para los conceptos metabólicos estudiados especialmente para los estudiantes del GC. Los resultados obtenidos se encuentran en sintonía con investigaciones anteriores (Duda et al., 2020; Garófalo et al., 2014) en cuanto que muestran dificultades para indicar el papel del oxígeno a nivel mitocondrial, o no entienden la fermentación como un proceso biológico de obtención de energía. Por otro lado, muestran también que el alumnado del GA, presenta menos errores conceptuales y lo que es más importante, que sus respuestas son más completas y ricas. Esto sugiere un aprendizaje más profundo por su parte, como apuntan los estudios previos sobre los conceptos relacionados con el metabolismo celular (García et al., 2021; Pereira y Ferreira, 2021). Estas definiciones del GA desvelaban una relación causal entre los procesos metabólicos y los procesos fisiológicos mediante los que se manifiestan, lo cual podría contrarrestar el aprendizaje exclusivamente memorístico y descontextualizado documentado para el estudio de los conceptos bioquímicos (Magnarelli et al., 2009).

Finalmente, el análisis cuantitativo de los cuestionarios cerrados corrobora lo mostrado por el análisis cualitativo, esto es, que la metodología Aquaroca produce aprendizajes más significativos para los conceptos relacionados con el catabolismo celular.

Fermentación

La fermentación es el más desconocido de todos los conceptos metabólicos (Duda et al., 2020), y genera graves errores conceptuales derivados de la incapacidad del alumnado de asociar situaciones cotidianas como son la elaboración de alimentos y bebidas fermentadas con los procesos bioquímicos que los producen. En el presente estudio hemos podido documentar estas dificultades en línea similar a estudios anteriores (Rodas, 2009; Salinas, 2020). El desconocimiento del término se puede asociar al menos en parte, a lo polisémico del mismo, que genera confusión en el alumnado. Aquaroca, al trabajar con microorganismos, estudiar su metabolismo y producirlo para el funcionamiento del ecosistema creado, permite unificar dentro del concepto de fermentación las acepciones microbiológica, industrial y bioquímica del mismo, lo que redundará en una comprensión más profunda del concepto.

La aplicación de sistemas de enseñanza que impliquen el uso de herramientas cognitivas diversas, como Aquaroca, nos permiten generar representaciones externas de los procesos catabólicos para que los alumnos puedan abordarlos desde distintos niveles de representación y les facilite la reconstrucción de su conocimiento acerca de la fermentación en los seres vivos (Martínez et al., 2014). En este sentido, los datos obtenidos nos muestran cómo los estudiantes de Aquaroca entienden mejor que la fermentación es un proceso que se realiza para obtener energía y que genera una serie de metabolitos secundarios que son utilizados en muchos casos por el hombre como fuente de alimentación o bebidas; de esa manera integran el concepto bioquímico con el mundo macroscópico.

Respiración Celular

El concepto de respiración celular es uno de los más presentes en la bibliografía debido tanto a su importancia y complejidad como a la cantidad de errores que suscita (Banet y Núñez, 1990). Nuestro estudio coincide en los errores de tipo universal ya detectados por otros autores como la no discriminación entre ventilación y respiración celular, lo cual es debido entre muchas otras causas a la dificultad que presenta el alumnado para conectar fenómenos biológicos complejos que ocurren a nivel microscópico con el mundo macroscópico (Farina, 2013; van Mil et al., 2013). Creemos que el desplazamiento del foco a modelos acuáticos que proporciona Aquaroca, permite al alumno disociar el concepto ventilación del de respiración ya que le implica un esfuerzo mental asemejar el proceso

fisiológico de la respiración de organismos acuáticos con la respiración celular, favoreciendo la comprensión de la utilidad del oxígeno en la obtención de energía.

En este sentido hemos detectado entre el alumnado del GC que no consideran la respiración como proceso de producción de energía o no saben para qué la utiliza luego el organismo, lo cual ya ha sido reportado por otros autores (Hartley et al., 2011). Hemos observado como el alumnado del GA, en cambio, entiende que el proceso respiratorio tiene como finalidad la producción de energía, probablemente porque ya no ve al oxígeno como un agente que se intercambia con el dióxido de carbono como ocurre en la ventilación pulmonar, sino como un agente activo en el proceso catabólico de un ser vivo.

En líneas generales coincidimos con Martínez (2014) en que la combinación de conceptos teóricos y la realización programada de prácticas de laboratorio apuntalan los aprendizajes significativos para el concepto de Respiración Celular. También Güneş (2011), cuyo grupo experimental trabajó el concepto de respiración celular mediante la elaboración de modelos de las vías metabólicas en el laboratorio, encuentra que los alumnos obtienen resultados más exitosos y generan menos conceptos erróneos.

Conclusiones

Este trabajo ha abordado el análisis del aprendizaje de conceptos relacionados con el metabolismo celular en estudiantes de Bachillerato mediante una metodología fundada en el aprendizaje cooperativo y apoyada en proyectos STEM (Proyecto Aquaroca), método que permite una formación basada en competencias, además de propiciar una alta satisfacción en los estudiantes y mejorar la posibilidad de aprender a aprender a lo largo de su formación. Los resultados obtenidos con el proyecto Aquaroca indican una mejoría significativa en el aprendizaje de los principales conceptos metabólicos, a lo que sin duda han contribuido los beneficios de un aprendizaje cooperativo con este tipo de proyectos (Bradforth et al., 2015; Cubero et al., 2018; García et al., 2021). También pueden proporcionar una mejora en la necesaria adquisición de una formación científica de base como parte esencial de la educación básica y general (Edwards et al., 2004; Rodas y Cubero, 2022).

El alumnado del GA produce respuestas más completas para el concepto de fermentación que los del GC, produciéndose una mejora significativa en los logros obtenidos por los alumnos para los conceptos implicados frente a una metodología magistral, generando actitudes positivas hacia la Ciencia, el proceso científico, los seres vivos del entorno en el que vivimos y la Naturaleza en general. La integración de las prácticas de laboratorio junto con los conceptos teóricos dentro de un proyecto de investigación, constituye un enfoque pedagógico que contribuye a disminuir la cantidad de errores conceptuales que presenta el alumnado del grupo experimental frente al grupo que sigue la metodología tradicional, puesto que permite conectar el mundo microscópico con el macroscópico, favoreciendo el establecimiento de relaciones entre los diferentes procesos bioquímicos a nivel celular y los fenómenos fisiológicos que ocurren a nivel del organismo, así como las implicaciones que tienen dichas reacciones metabólicas a nivel global.

Limitaciones

Aunque para el trabajo a nivel de laboratorio no plantea más problema que la ubicación de los acuarios, la filosofía multidisciplinar del proyecto provoca que una gran diversidad de Departamentos Didácticos participe del mismo, lo que requiere un esfuerzo de coordinación extra por parte del profesorado, para que se procuren unas situaciones de aprendizaje adecuadas al alumnado. Es pues necesario la implicación del docente, sin

la cual la metodología se reduce a una única actividad de aprendizaje. En este sentido se hace necesaria una formación pedagógica suficiente del docente y una organización cuidadosa del proceso, para evitar la sobrecarga de trabajo y el consiguiente abandono de la metodología.

Agradecimientos

El proyecto fue reconocido como proyecto de innovación STEAM y financiado por la Junta de Extremadura.

Referencias bibliográficas

- Banet, E., y Núñez, E. (1990). Esquemas conceptuales de los alumnos sobre la respiración. *Enseñanza de Las Ciencias*, 8(2), 105–110. DOI: <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.4925>
- Berg, J. M., Tymoczko, J. L., y Stryer, L. (2008). *Bioquímica*. (Sexta Edic). Reverté S.A.
- Bradforth, S. E., Miller, E. R., Dichtel, W. R., Leibovich, A. K., Feig, A. L., Martin, J. D., Bjorkman, K. S., Schultz, Z. D., y Smith, T. L. (2015). University learning: Improve undergraduate science education. *Nature*, 523, 282–284. DOI: <https://doi.org/10.1038/523282a>
- Brown, M. H., y Schwartz, R. S. (2009). Connecting photosynthesis and cellular respiration: Preservice teachers' conceptions. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(7), 791–812. DOI: <https://doi.org/10.1002/tea.20287>
- Caamaño, A. (2007). Los trabajos prácticos en ciencias. In M. P. Jiménez Aleixandre (Ed.), *Enseñar Ciencias*. Grao.
- Çakir, Ö. S., Geban, Ö., y Yürük, N. (2002). Effectiveness of conceptual change text-oriented instruction on students' understanding of cellular respiration concepts. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 30(4), 239–243. DOI: <https://doi.org/10.1002/bmb.2002.494030040095>
- Charrier, M., Cañal, P., y Rodrigo, M. (2006). Las concepciones de los estudiantes sobre la fotosíntesis y la respiración: una revisión sobre la investigación didáctica en el campo de la enseñanza y el aprendizaje de la nutrición de las plantas. *Enseñanza de Las Ciencias*, 24(3), 401–410. DOI: <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3790>
- Creswell, J. W. (2015). *A Concise Introduction to Mixed Methods Research*. SAGE Publications, Ed.
- Cubero, J., Sánchez, S., Vallejo, J. R., Luengo, L., Calderón, M., y Bermejo, M. L. (2018). Aprendizaje cooperativo para la formación universitaria en alfabetización en salud. *Revista de La Fundación Educación Médica*, 21(2), 97–100. DOI: <https://doi.org/10.33588/fem.212.938>
- Decreto 109/2022, de 22 de agosto, por el que se establecen la ordenación y el currículo del Bachillerato para la Comunidad Autónoma de Extremadura. *DOE* 164, 25 de agosto 2022.
- Duda, H. J., Wahyuni, F. R. E., y Setyawan, A. E. (2020). Misconception of the biology education students on the concepts of fermentation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1521, 42006. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1521/4/042006>
- Edwards, M., Gil, D., Vilches, A., y Praia, J. (2004). La atención a la situación del mundo en la educación científica. *Enseñanza de Las Ciencias*, 22(1), 47–64. DOI: <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3902>

- Farina, J. (2013). Conceptos previos sobre respiración y función biológica del oxígeno en estudiantes ingresantes a la carrera de Psicología. *Revista de Educación En Biología*, 16, 31–40. DOI: <https://doi.org/10.59524/2344-9225.v16.n2.22396>
- García, A., Martínez, B., Blanco, A., Quesada, A., Suárez, F., Alonso, F. J., y Medina, M. (2021). A problem/case-based learning approach as useful tool for studying glycogen metabolism and its regulation. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 49. DOI: <https://doi.org/10.1002/bmb.21449>
- Garófalo, S. J., Alonso, M., y Galagovsky, L. (2014). Nueva propuesta teórica sobre obstáculos epistemológicos de aprendizaje. El caso del metabolismo de los carbohidratos. *Enseñanza de Las Ciencias*, 32(3), 155–171. DOI: <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.1042>
- Güneş, M. H. (2011). Modelling about energy transformation in living organism. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 15, 1183–1187. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2011.03.260>
- Harmon, T. (2003). NFT aquaponic systems: a closer look. *Aquaponics Journal*, 31, 8–11.
- Hart, E. R., Webb, J. B., y Danylchuk, A. J. (2013). Implementation of aquaponics in education: An assessment of challenges and solutions. *Science Education International*, 24(4), 460–480.
- Hartley, L. M., Wilke, B. J., Schramm, J. W., D'Avanzo, C., y Anderson, C. W. (2011). College Students' Understanding of the Carbon Cycle: Contrasting Principle-based and Informal Reasoning. *BioScience*, 61(1), 65–75. DOI: <https://doi.org/10.1525/BIO.2011.61.1.12>
- Ho Chan, K. K., West, J., y Keung Ng, R. C. (2021). Using Yeast Fermentation as a Context for Meaningful Learning of Procedural Understanding. *The American Biology Teacher*, 83(1), 26–32. DOI: <https://doi.org/10.1525/ABT.2021.83.1.26>
- Jiménez, A. (2013). Acuaponía: Herramienta educativa para el aprendizaje transversal de las ciencias. *Ciencia y Desarrollo*, 16(2), 83–90. DOI: <https://doi.org/10.21503/cyd.v16i2.1113>
- Lederman, N. G., Lederman, J. S., y Antink, A. (2013). Nature of Science and Scientific Inquiry as Contexts for the Learning of Science and Achievement of Scientific Literacy. *International Journal of Education in Mathematics*, 1(3), 138–147.
- Lobillo, J. R., Fernández, V. M., Carmona, E., y Candón, F. J. L. (2014). Manejo básico y resultados preliminares de crecimiento y supervivencia de tencas (*Tinca tinca* L.) y lechugas (*Lactuca sativa* L.) en un prototipo acuapónico. *ITEA*, 110(2), 142–159. DOI: <https://doi.org/10.12706/itea.2014.009>
- Lune, H., y Berg, B. L. (2017). *Qualitative Research Methods for the Social Sciences (Ninth Edit)*. Pearson Education Limited.
- Magnarelli, G., Quintana, M. M., García, L., Villagrán, E., Cabrera, L., y Ruiz, L. (2009). El trabajo en pequeños grupos facilita la enseñanza-aprendizaje de Bioquímica. *Revista Brasileira de Educação Médica*, 33(3), 374–381. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-55022009000300008>
- Martínez, C., García, B., Gallegos, L., y López, S. (2014). Transformación de las ideas sobre catabolismo de estudiantes de Bachillerato, después de participar en la aplicación de una secuencia didáctica diseñada para el proyecto Laboratorios de Ciencias del Bachillerato UNAM. *Revista de Educación En Biología*, 17(1), 25–37. DOI: <https://doi.org/10.59524/2344-9225.v17.n1.22414>

- McMurtry, M. R., Sanders, D. C., Patterson, R. P., y Nash, A. (1993). Yield of Tomato Irrigated with Recirculating Aquacultural Water. *Journal of Production Agriculture*, 6(3), 428–432. DOI: <https://doi.org/10.2134/jpa1993.0428>
- Muñoz, V., Franco, A. J., y Blanco, Á. (2020). 'Integration of scientific practices into daily living contexts: a framework for the design of teaching-learning sequences.' *International Journal of Science Education*, 42(15), 2574–2600. DOI: <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1821932>
- Muñoz, V., Franco, A. J., y Blanco, Á. (2018). Modelos mentales de estudiantes de educación secundaria sobre la transformación de la leche en yogur. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 15(2), 1–20. DOI: https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2018.v15.i2.2106
- Pereira, V. C., y Ferreira, W. (2021). Interactive Metabolism, a simple and robust active learning tool that improves the biochemistry knowledge of undergraduate students. *Advances in Physiology Education*, 45, 353–364. DOI: <https://doi.org/10.1152/advan.00042.2020>
- Pérgola, M., y Galagovsky, L. (2020). Estudio didáctico-epistemológico sobre la relación entre los modelos de respiración celular y de combustión. *Revista de Educación En Biología*, 23(1), 49–63. DOI: <https://doi.org/10.59524/2344-9225.v23.n1.28149>
- Rakocy, J. E., Bailey, D. S., Shultz, R. C., y Thoman, E. S. (2010). *Update on tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system* (pp. 1–15). University of the Virgin Islands. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/237308635_Update_on_tilapia_and_vegetable_production_in_the_UVI_aquaponic_system
- Real Decreto 243/2022 de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato. *BOE* núm. 82, de 06/04/2022.
- Rodas, M. (2009). *Ideas alternativas de alumnos de grado medio de la familia profesional de Industrias alimentarias sobre el concepto de Higiene*. UEX.
- Rodas, M., y Cubero, J. (2022). El diseño del artículo de investigación como generador de vocaciones científicas. *Revista Electrónica Interuniversitaria de Formación Del Profesorado*, 25(1), 61–77. DOI: <https://doi.org/10.6018/reifop.502731>
- Russell, C. B., y Weaver, G. C. (2011). A comparative study of traditional, inquiry-based, and research-based laboratory curricula: Impacts on understanding of the nature of science. *Chemistry Education Research and Practice*, 12(1), 57–67. DOI: <https://doi.org/10.1039/C1RP90008K>
- Salinas, I. S. (2020). ¿Cómo sobrevivir a la enseñanza del metabolismo celular en bachillerato? *Revista Digital Universitaria*, 21(2), 11. DOI: <https://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2020.v21n2.a8>
- Scaglione, M., Cadoche, L., Cerutti, R., García, M., y Boscarol, B. M. (2019). La acuaponia como estrategia didáctica para la integración de conocimientos. *El Cardo*, 21(15), 53–73.
- Shana, Z., y Abulibdeh, E. S. (2020). Science practical work and its impact on students' science achievement. *Journal of Technology and Science Education*, 10(2), 199–215. DOI: <https://doi.org/10.3926/jotse.888>
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., y Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. En FAO (Ed.), *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper* (Vol. 589).

- Songer, C. J., y Mintzes, J. J. (1994). Understanding cellular respiration: An analysis of conceptual change in college biology. *Journal of Research in Science Teaching*, 31(6), 621–637. DOI: <https://doi.org/10.1002/TEA.3660310605>
- Souza, F. N., Costa, A. P., y Moreira, A. (2011). Análise de Dados Qualitativos Suportada pelo Software WebQDA. *VII Conferência Internacional de TIC Na Educação: Perspectivas de Inovação*, 9.
- Van Mil, M. H. W., Boerwinkel, D. J., y Waarlo, A. J. (2013). Modelling Molecular Mechanisms: A Framework of Scientific Reasoning to Construct Molecular-Level Explanations for Cellular Behaviour. *Science and Education*, 22(1), 93–118. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11191-011-9379-7>