

Estudio didáctico-epistemológico sobre la relación entre los modelos de respiración celular y de combustión

Didactic-Epistemological Study on the Relationship between Cellular Respiration and Combustion Models

Martín Pégola¹ y Lydia Galagovsky

Instituto CEFIEC, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, CABA, Argentina

¹martinpergola@ccpems.exactas.uba.ar

Recibido 11/04/2020 – Aceptado 22/05/2020

Resumen

En la enseñanza de la respiración celular se utiliza una analogía entre la respiración y la combustión química, expresada por una ecuación global advirtiendo que se trata de una “combustión controlada”. La relación entre los procesos de respiración y combustión surge a fines del siglo XVIII, durante el debate entre defensores de la teoría del flogisto y sus detractores. En esta Investigación se presenta un análisis de la construcción conceptual de la respiración celular por parte de estudiantes y del uso de la comparación entre la respiración celular y la combustión durante actividades de enseñanza. La investigación es parte de una Tesis Doctoral sobre dificultades en la enseñanza y obstáculos en el aprendizaje de respiración celular.

Palabras clave: Respiración celular; Combustión; Química Biológica; Lenguaje químico; Analogías

Abstract

In the teaching of cellular respiration, an analogy is presented between respiration and chemical combustion, represented by a global equation warning that it is a “controlled combustion”. The relationship between the processes of respiration and combustion arises at the end of the 18th century, during the debate between defenders of the phlogiston theory and its detractors. This research presents an analysis of the conceptual construction of cellular respiration by students and the use of the comparison between cellular respiration and combustion during teaching activities. The research is part of a doctoral thesis on difficulties in teaching and obstacles in learning cellular respiration.

Keywords: Cellular respiration; Combustion; Biological Chemistry; Chemical Language; Analogies

Introducción y objetivos

Los contenidos relacionados con bioenergética, metabolismo y respiración celular son presentados a partir de los primeros años de la escuela media en la asignatura Biología y luego son profundizados en los primeros años de carreras universitarias relacionadas con ciencias de la salud, ciencias biológicas, ciencias de alimentos, etc. En el Ciclo Básico Común (CBC) de las carreras de la Universidad de Buenos Aires (UBA) estos contenidos se tratan en el primer año, en la materia "Biología" y "Biología e Introducción a la Biología Celular" y, en años posteriores, en materias como "Bioquímica" o "Química Biológica" son profundizados en algunas carreras como Biología, Química, Medicina, Bioquímica, Veterinaria, etc.

Durante la enseñanza de la respiración celular en distintos niveles educativos, se suele encontrar en los discursos de docentes, en materiales didácticos y libros, la exposición del tema como una analogía de la combustión química, acompañada por lenguaje de fórmulas químicas, pero advirtiendo que se trata de una "combustión controlada, gradual o escalonada".

La comprensión de la comparación entre los modelos de ambos procesos supone, al menos, haber comprendido el modelo científico de combustión química y el significado de su expresión en el lenguaje de fórmulas químicas, de la ecuación que suele acompañar la presentación en lenguaje verbal del proceso. Dado que en ocasiones esta comparación se emplea con estudiantes que no han cursado materias de química previamente, su comprensión sobre la reacción y el modelo científico de combustión puede ser deficiente, lo cual implica un potencial obstáculo tanto para el aprendizaje de la pretendida comparación como de la respiración celular.

En este trabajo se presenta una Investigación acerca de la construcción conceptual de la respiración celular y del uso de la analogía entre ella y la combustión química. Esta investigación es una parte de otra más amplia en el marco de una Tesis de Doctorado acerca de dificultades en la enseñanza y obstáculos en el aprendizaje sobre la respiración celular.

Los objetivos generales son:

- Analizar cómo influye el uso de la analogía de la respiración celular con la combustión durante la enseñanza, en la construcción conceptual del proceso de respiración celular;
- Analizar los posibles errores de aprendizaje que pudieran surgir a partir de la utilización de dicha analogía, indagando respuestas de docentes de escuela media en ejercicio, y de un grupo de estudiantes de Biología del Ciclo Básico Común de la UBA.

Los objetivos específicos de esta investigación son:

- Identificar formas de presentación de los contenidos de respiración celular en clases universitarias, materiales didácticos y libros de texto y su relación con el aprendizaje de estos contenidos.

- Determinar elementos de la construcción conceptual de la respiración celular en estudiantes de los primeros años universitarios e identificar errores en dicha conceptualización.
- Registrar dificultades en el aprendizaje de la respiración celular que podrían generarse por el uso del lenguaje químico.

Referentes teóricos y antecedentes

La respiración celular aeróbica es un proceso metabólico que ocurre en todas las células de los seres vivos. En el caso de los organótrofos implica: la glucólisis (ocurre en el citoplasma) que es la vía metabólica de degradación oxidativa de la glucosa; el ciclo de Krebs donde los productos de la glucólisis se oxidan hasta CO_2 y H_2O (ocurre en la matriz mitocondrial); la cadena respiratoria y la fosforilación oxidativa donde se genera ATP mediante un gradiente de protones y la actividad de la ATP sintasa (ocurren en membrana interna mitocondrial y espacio intermembrana). El proceso involucra numerosas reacciones bioquímicas donde intervienen enzimas que por tramos logran balances energéticos favorables y se encuentran en sitios celulares específicos, por eso globalmente es considerado un proceso compartimentalizado.

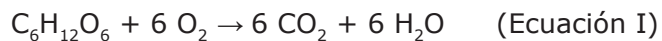
El libro "Biología molecular de la célula" de Lodish et al. (2016), presenta el proceso de respiración celular de la siguiente manera:

"En plantas, animales y casi todos los demás organismos, la energía libre en azúcares y otras moléculas derivadas de los alimentos se libera en los procesos de glucólisis y respiración celular. Durante la respiración celular, las moléculas ricas en energía en los alimentos (por ejemplo, glucosa) se oxidan a dióxido de carbono y agua." (Lodish et al., 2016, p. 63)

El libro "Principios de Bioquímica" de Nelson y Cox (2017), recomendado frecuentemente en la bibliografía de materias como Bioquímica o Química Biológica, la respiración celular se presenta de la siguiente manera:

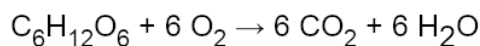
"(El proceso por el cual) la mayoría de las células eucariotas y muchas bacterias, que viven en condiciones aeróbicas, oxidan sus combustibles orgánicos en dióxido de carbono y agua, (siendo) la glucólisis la primera etapa en la oxidación completa de la glucosa. (...) el piruvato producido por la glucólisis se oxida aún más a H_2O y CO_2 . Esta fase aeróbica del catabolismo se llama respiración. En el sentido fisiológico o macroscópico más amplio, la respiración se refiere a la absorción de O_2 de un organismo multicelular y la liberación de CO_2 . Sin embargo, los bioquímicos y los biólogos celulares usan el término en un sentido más estricto para referirse a los procesos moleculares por los cuales las células consumen O_2 y producen CO_2 , procesos que se denominan con mayor precisión como respiración celular." (Nelson y Cox, 2017, p. 1667)

La forma de representación de la globalidad del proceso de respiración celular y de la reacción de combustión mediante lenguaje de reacciones químicas se muestra en la Ecuación I.



Se muestra en la Figura 1 el contexto en el que se presenta la Ecuación I en el libro "Biología molecular de la célula" de Lodish et al. (2016).

En plantas, animales y casi todos los demás organismos, la energía libre en azúcares y otras moléculas derivadas de los alimentos se libera en los procesos de glucólisis y respiración celular. Durante la respiración celular, las moléculas ricas en energía en los alimentos (por ejemplo, glucosa) se oxidan a dióxido de carbono y agua. La oxidación completa de la glucosa,



tiene un ΔG° de -686 kcal/mol y es el reverso de la fijación fotosintética de carbono. Las células emplean un elaborado conjunto de reacciones mediadas por proteínas para acoplar la oxidación de 1 molécula de glucosa a la síntesis de hasta 30 moléculas de ATP a partir de 30 moléculas de ADP.

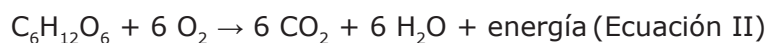
Figura 1: Extracto del libro de Lodish et al. (2016, p. 63) donde se exhibe la ecuación de respiración celular.

La representación mediante lenguaje de fórmulas químicas, implica recurrir a una ecuación química balanceada donde se expresan reactivos y productos (Ecuación I), cumpliendo con el balance de masa, relacionando reactivos y productos mediante una flecha que representa conversión total a productos (Galagovsky y Giudice, 2015).

La enseñanza de la respiración celular suele considerarse como una analogía de la combustión química, representada por una ecuación global (Ecuación I), advirtiendo que se trata de un proceso gradual en el caso de la respiración celular y no instantánea como en el caso de la combustión. Sin embargo, existen investigaciones que señalan las concepciones de estudiantes y las dificultades en el aprendizaje de la combustión (Andersson, 1986, 1990; Meheut, Saltiel y Tiberghien, 1985; Prieto y Watson, 2007), así como de la respiración (Tamayo Alzate y Sanmartí, 2003; Farina, 2013; Tamayo Alzate, Orrego Cardozo y Dávila Posada 2014). Por lo tanto, recurrir a una analogía entre combustión química y respiración celular puede actuar como una fuente de obstáculos para el aprendizaje de este último proceso.

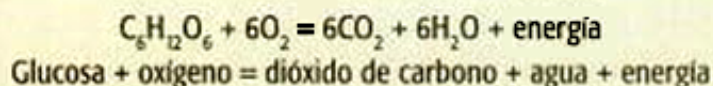
Una ecuación similar a la Ecuación I suele aparecer en algunos libros de enseñanza de la biología o en los materiales didácticos usados para enseñar respiración celular;

un ejemplo es la Ecuación II, presente en el libro "Biología" (Curtis, Barnes, Schnek y Massarini, 2008):



La diferencia entre la Ecuación I y la Ecuación II es el término energía a la derecha de la flecha, indicando que la misma es un producto de la reacción. Se muestra en la Figura 2 el contexto en el que se presenta la Ecuación II en el libro "Biología" de Curtis et al. (2008).

do a pensar que, desde el punto de vista químico, el metabolismo celular guarda algunas semejanzas con el proceso de *combustión*, proceso rápido en el que generalmente un compuesto que contiene carbono se oxida, liberándose dióxido de carbono, agua y calor si ocurre en forma completa. Sin embargo, cuando los seres vivos oxidan carbohidratos (véase Apéndice 2), convierten en forma controlada la energía almacenada en los enlaces químicos en otras formas de energía según una reacción global:



Según la primera ley de la termodinámica, la suma de la energía de los productos más la energía liberada durante la reacción es igual a la energía inicial contenida en las sustancias que reaccionan. Es importante comprender que esta ecuación representa el cambio químico global producido en la degradación de la glucosa. Sin embargo, en los organismos vivos hay una gran cantidad de pasos intermedios que aumentan la eficiencia con que una gran parte de la energía contenida en los enlaces químicos de la glucosa puede ser convertida en energía aprovechable o energía útil. Estos pasos se revisan en el capítulo si-

Figura 2: Extracto del libro de Curtis et al. (2008, p. 75) donde se presenta el metabolismo celular como un proceso semejante a la combustión química.

La similitud o analogía entre ambas ecuaciones puede conducir a no tomar conciencia sobre las grandes diferencias entre los dos procesos. Desde la Didáctica de las Ciencias,

cabe reflexionar sobre este punto, en tanto y en cuando obviar dichas diferencias puede conducir a errores en el aprendizaje.

El análisis que se llevará a cabo en esta Investigación deriva de dos marcos teóricos: por un lado, la consideración de la química como formada por un conjunto de lenguajes específicos que describen modelos teóricos de orden simbólico (Galagovsky y Giudice, 2015) Por otro lado, sobre la discriminación de las características didácticas que deben considerarse para el diseño de un Modelo Didáctico Analógico (Galagovsky y Greco, 2009).

Finalmente, la discusión sobre los alcances y limitaciones de la analogía entre combustión química y la respiración celular, en tanto son dos modelos científicos diferentes, han sido publicados previamente por Pégola y Galagovsky (2019). Se presenta la correlación analógica entre procesos en la Tabla 1.

Metodología

La metodología utilizada durante la presente Investigación es una metodología cualitativa ligada a la "teoría fundamentada" (Vasilachis de Gialdino et al., 2006) con un diseño ex post facto, con el fin de explorar la construcción conceptual de la respiración celular en el alumnado, y el uso de la analogía combustión química-respiración celular. En el marco de la investigación para cumplir los objetivos propuestos se realizaron las siguientes actividades:

1. Revisión y análisis de los temas de respiración celular de los libros "Biología" (Curtis et al., 2008), "Biología Molecular de la Célula" (Alberts et al., 2014) y "Biología molecular de la célula" (Lodish et al., 2016). Son recomendados en la materia Biología del Ciclo Básico Común (CBC-UBA), que es la primera materia universitaria donde se tratan temas de respiración celular, común a distintas carreras universitarias, y es cursada por más de 4000 estudiantes por cuatrimestre.

2. Generación de un cuestionario (Figura 2) con preguntas con múltiples opciones de respuesta, de tal forma que quienes respondieran tuvieran que marcar todas las respuestas posiblemente correctas de acuerdo a su criterio, por escrito, en 15-20 minutos. Este punto se desarrolla en profundidad luego en este trabajo.

3. Observaciones de clases de la materia Biología (CBC-UBA) con el fin de indagar como se transpusieron los contenidos de respiración celular y la forma de presentación de la analogía respiración-combustión. En todos los casos fueron observaciones no participantes.

4. Aplicación del cuestionario a estudiantes de Biología del CBC, luego de haber rendido el parcial donde se evaluó el tema respiración celular. La implementación fue en los tres cursos distintos de la materia Biología (CBC-UBA) donde se realizaron las observaciones de clase. La participación fue por escrito, voluntaria y convocó a 100 estudiantes. Queda pendiente el análisis de la aplicación del cuestionario con estudiantes de la materia Química Biológica o Bioquímica (materia de tercer o cuarto año dependiendo de la carrera).

Tabla 1: Tabla de correlación conceptual entre la combustión química y la respiración celular.

Concepto de combustión química	Concepto bioquímico de respiración celular
1. Ec. qca. de combustión completa de glucosa $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$	1. Ec. qca. de la respiración celular aeróbica $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$
a) Implica un balance de masa; no se menciona energía liberada ni consumida durante la reacción.	a) Implica un balance de masa; no se menciona energía liberada ni consumida durante la reacción.
b) Ocurre en un solo volumen de reacción, pero esto no es representado	b) Ocurre en diferentes compartimentos biológicos, pero esto no es representado.
c) Se presentan como reactivos combustible (glucosa) y comburente (oxígeno).	c) Se presentan como reactivos combustible (glucosa) y comburente (oxígeno).
d) Hay "combinación directa" entre reactivos.	d) No hay "combinación directa" entre reactivos, ya que si bien el O ₂ está disuelto en el medio celular: es ubicuo. Su captación para ser reducido se da con mediación de citocromos en la membrana interna de mitocondria.
e) Es instantánea, ocurre en un único paso que requiere alta energía de activación. Es necesario superarla para que ocurra la reacción.	e) No es instantánea. Involucra numerosas reacciones con mecanismos donde con enzimas, que por tramos logran balances energéticos favorables para que las reacciones sean posibles.
2. Ecuación química de la combustión completa de la glucosa con mención de la energía liberada. $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O \Delta H < < 0$	2. Ecuación química del proceso global de la respiración celular aeróbica con mención de la energía liberada. $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 38 \text{ ATP}$
a) La energía liberada se representa cualitativamente por balance de entalpía libre negativo. La energía de activación no se representa.	a) La energía liberada se presenta cuantificada entre los productos con 38 ATPs. La energía de activación no se representa.
b) El aceptor de electrones se encuentra en estado gaseoso (oxígeno).	b) El aceptor de electrones está disuelto en el medio celular (O ₂ disuelto). El O ₂ que se reducirá se encuentra formando un complejo con citocromos en la cadena de transporte de electrones.
c) Puede ocurrir en cualquier lugar donde se encuentren los reactivos (óxido-reducción instantánea), si hay suficiente energía de activación.	c) Ocurre en dos compartimentos: glucólisis (oxidación parcial a compuestos de 3 carbonos) en citosol; Krebs (oxidación total de compuestos de tres carbonos), fosforilación oxidativa y cadena de transporte de electrones en mitocondria, donde existen citocromos con afinidad por el O ₂ que será el reactivo reducido.
d) Reacción con energía de activación alta para que ocurran simultáneamente en el mismo volumen las reacciones de óxido-reducción con ruptura de enlaces C-H y generación de enlaces O-H (transferencia instantánea de electrones).	d) Reacciones con energías de activación bajas, mediadas por enzimas, que logran oxidación de materia orgánica mediante la eliminación de hidrógenos, en citosol y en matriz de mitocondria.

5. Aplicación del cuestionario a 14 docentes de Ciencias Naturales de escuela media de distintas zonas del país en el marco de un taller organizado dentro de la Semana de la Enseñanza de las Ciencias de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA (edición 2018), con el fin de comparar sus elecciones con las de estudiantes (se aplicó el cuestionario en otras poblaciones de docentes en distintos talleres, pero en este trabajo sólo se analiza este grupo reducido con fines comparativos).

Generación del cuestionario de indagación

Los y las docentes de Química y Biología que enseñan contenidos de respiración celular, muestran experticia en los modelos científicos en torno a estos contenidos, tienen habilidades para operar con los mismos y relacionarlos con los fenómenos naturales modelados. Cuando presentan en sus clases la respiración celular comparándola con la combustión química o usan discursos que implican que “la respiración celular es como la combustión de la materia orgánica pero se libera la energía de forma gradual” (extracto de la grabación de una de las clases observadas), están realizando una analogía entre distintos procesos desde sus modelos mentales expertos, que son similares a los modelos científicos canónicos (Galagovsky y Giudice, 2015; Galagovsky, Di Giacomo y Alí, 2015).

Toda analogía requiere una comparación entre un dominio base con elementos reconocidos y un dominio destino, que en este caso serían la combustión y la respiración celular, respectivamente. Las analogías en la enseñanza de las Ciencias no suelen resultar evidentes para estudiantes que desconocen los modelos científicos que son objeto de la misma. Desarrollar la analogía requiere construir la correlación conceptual entre ambos dominios, lo cual se presenta en una tabla (Galagovsky y Greco, 2009), que explicita similitudes y particularidades entre dominios, tal como se presentan para el caso de la combustión y la respiración celular en la Tabla 1.

A pesar de ser la combustión un proceso cotidiano para estudiantes, los conceptos científicos en torno a este fenómeno no les resultan sencillos, por lo cual la analogía que construyan puede ser muy distinta a la que presentan sus docentes durante las actividades de enseñanza, y la relación entre dominios, alternativas a la que profesores pretenden.

Para detectar concepciones acerca de las relaciones entre la combustión y la respiración celular se diseñó un cuestionario original de cuatro preguntas, sobre el que se solicitó a estudiantes que marcaran todas las opciones de respuesta que consideraran correctas.

Las reacciones de combustión completa del metano (ecuación 1 en el cuestionario), de combustión completa de glucosa (ecuación 2 en el cuestionario) y respiración celular aeróbica (ecuación 3 en el cuestionario) se tomaron de materiales didácticos utilizados en clases o de los libros consultados.

Las opciones de respuesta se diseñaron tomando como base frases u oraciones similares a las encontradas en los discursos de profesores durante sus explicaciones verbales en las clases observadas o frases similares a las presentadas en los libros de texto universitarios.

En el presente trabajo se muestra la primera pregunta del cuestionario (Figura 2). Esta pregunta tenía un párrafo inicial sobre el cual se presentaron 12 opciones de respuestas que pretendían relevar hasta qué punto los sujetos indagados podían discriminar diferencias entre conceptos propios del modelo de combustión química y del modelo de respiración celular, en tanto sus representaciones simbólicas en lenguaje de fórmulas son similares (Tabla 1).

1) A continuación se presentan las ecuaciones de la combustión completa de metano, de combustión completa de glucosa y de la respiración celular de glucosa. Marca con una x las opciones que consideres correctas.

Combustión completa del metano: $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ (1)
 Combustión completa de glucosa: $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ (GLUCOSA) + $6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ (2)
 Respiración celular aeróbica: $\text{GLUCOSA} + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + 38 \text{ ATP}$ (3)

(a) 1 molécula de glucosa y 6 de O_2 se combinan en las células de los seres vivos para generar 38 de ATP.
 (b) 1 mol de glucosa y 6 moles de O_2 se combinan en las células de los seres vivos para generar 38 de ATP.
 (c) La combustión completa es una reacción de oxidación donde se libera energía en forma de calor y luz.
 (d) La respiración celular es la combustión completa de glucosa.
 (e) En toda reacción química se conserva la masa de reactivos y productos.
 (f) En la respiración celular la masa de glucosa se transforma parcialmente en ATP.
 (g) En las células la combustión completa de glucosa permite que se transforme parcialmente en ATP.
 (h) En las células la respiración celular ocurre cuando hay contacto directo entre la glucosa y el oxígeno.
 (i) En la combustión completa hay contacto directo entre el combustible y el comburente.
 (j) En la combustión completa del metano el O_2 se reduce a agua "utilizando" hidrógeno del metano (CH_4).
 (k) En la combustión completa de la glucosa el O_2 se reduce a agua "utilizando" hidrógeno de la glucosa.
 (l) En la respiración celular el oxígeno se reduce a agua "utilizando" hidrógeno de la glucosa.

Figura 3. Cuestionario de indagación sobre alcances y limitaciones en la analogía entre combustión química y respiración celular.

Resultados y discusión

En las clases observadas, las docentes trataron el tema de respiración celular aeróbica y mencionaron de alguna manera la comparación con la combustión de materia orgánica. Cuando realizaron la comparación hicieron referencia a la respiración celular como una combustión en varias etapas, escalonada o graduada, donde se libera la energía de forma gradual y controlada, a diferencia de la combustión donde la energía se libera en una única etapa.

Al presentar las reacciones indicaron la actividad de enzimas como catalizadores biológicos y señalaron los lugares de la célula donde cada uno de los procesos ocurrían (glucólisis, ciclo del ácido cítrico, cadena respiratoria y fosforilación oxidativa). Por último, como los procesos suceden en distintas zonas de la célula, las docentes mencionaron que existe transporte específico de sustancias a través de membranas mediante distintos mecanismos con y sin gasto de energía.

Con posterioridad al examen donde se evaluaron los temas de respiración celular, se invitó a estudiantes a participar del cuestionario de cuatro preguntas, del que se muestra el análisis de la pregunta 1 (Figura 2) que respondieron un total de 99 estudiantes. En la Tabla 2, se exhiben los porcentajes de respuestas obtenidos para cada ítem. Los porcentajes no son representativos del total de estudiantes que cursan la materia Biología del CBC (aproximadamente unos 4000 por cuatrimestre), pero sí son indicadores cualitativos que permiten inducir algunas concepciones de estudiantes acerca de la respiración celular y la combustión.

Tabla 2: Porcentajes de respuestas al Cuestionario de la Figura 2, aplicados a 14 docentes de escuela media y a 99 estudiantes de Biología del CBC. Coloreadas se señalan las distintas opciones de respuesta y si son correctas o incorrectas

Opciones de respuesta pregunta 1	Docentes (n = 14)	Estudiantes (n = 99)
a) 1 molécula de glucosa y 6 de O ₂ se combinan en las células de los seres vivos para generar 38 de ATP.	57%	53 %
b) 1 mol de glucosa y 6 moles de O ₂ se combinan en las células de los seres vivos para generar 38 de ATP.	36 %	27 %
c) La combustión completa es una reacción de oxidación donde se libera energía en forma de calor y luz.	14 %	28 %
d) La respiración celular es la combustión completa de glucosa.	36 %	37 %
e) En toda reacción química se conserva la masa de reactivos y productos.	57 %	23 %
f) En la respiración celular la masa de glucosa se transforma parcialmente en ATP	28 %	28 %
g) En las células la combustión completa de glucosa permite que se transforme parcialmente en ATP.	21 %	15 %
h) En las células la respiración celular ocurre cuando hay combinación directa entre la glucosa y el oxígeno.	14 %	26 %
i) En la combustión hay combinación directa entre combustible y comburente.	64 %	25 %
j) En la combustión completa del metano el O ₂ se reduce a agua "utilizando" hidrógeno del metano (CH ₄).	36 %	32 %
k) En la combustión completa de la glucosa el O ₂ se reduce a agua "utilizando" hidrógeno de la glucosa.	29 %	32 %
l) En la respiración celular O ₂ se reduce a H ₂ O "utilizando" hidrógeno de la glucosa.	21 %	22 %

Modelo de respiración celular: opciones a, b, d, f, g, h y l incorrectas.

Modelo de combustión química: opciones c, i, j, k correctas.

Modelos químicos generales: opción e correcta.

A continuación, se presentan los principales resultados a partir de las respuestas y su análisis.

Modelo de respiración celular

Opciones a y b incorrecta. La Ecuación II presentada en la sección 2 y la ecuación (3) presentada en el cuestionario no permiten un balance de masa, lo cual es necesario desde el lenguaje de reacciones químicas. Sin embargo, son ecuaciones utilizadas por los docentes en el marco de las explicaciones biológicas, en los materiales didácticos y en los libros de texto. Estas ecuaciones pueden ser representativas de los procesos de respiración celular, aunque no cumplan con los requisitos del lenguaje de reacciones químicas, pues la inclusión del término energía o de los 38 ATP como productos de la reacción inhabilitan un balance de masa y que se cumpla una relación estequiométrica (Galagovsky y Giudice, 2015; Galagovsky et al., 2015).

En cuanto a la forma de redacción de las opciones (a) y (b) incluyen algunos términos que habilitan una reflexión sobre su significado y el significado que le confieren a la oración. La referencia en lenguaje verbal a que la glucosa y el oxígeno "se combinan" sería

equivalente al código del signo de suma (+) utilizado en lenguaje de reacciones químicas. Sin embargo, de acuerdo al modelo bioquímico, glucosa y oxígeno no se combinan durante la respiración celular pues, aunque ambos pueden estar presentes al mismo tiempo en el citoplasma, la reacción entre ellos no ocurre espontáneamente en el medio celular en las condiciones fisiológicas.

Por otro lado, la expresión acerca que glucosa y oxígeno se combinan “para generar” ATP tiene una connotación teleológica evidente. Si bien como manifiesta Talanquer (2007) las formas teleológicas del discurso pueden ser herramientas pedagógicas útiles en muchos casos por su valor heurístico en la educación química, también pueden conducir al desarrollo de concepciones alternativas y sobregeneralizaciones injustificadas. En este caso se podría optar por una formulación alternativa que indicara que glucosa y oxígeno “generan” ATP y omitir la expresión “para generar”, o si se opta por la formulación original, advertir que el proceso no persigue una finalidad predeterminada.

El porcentaje de elección de las opciones (a) y (b) por parte de docentes es mayor al de estudiantes, cuando lo que se esperaba era que profesores señalaran estas opciones como incorrectas por los argumentos señalados anteriormente.

Opciones d y g incorrectas. Si bien es posible realizar una comparación entre la combustión química de la glucosa y la respiración celular, tanto mediante lenguaje verbal como con la Ecuación I, ambos procesos son distintos desde el punto de vista químico y se explican mediante distintos modelos.

La combustión es un proceso químico que implica la transformación de materia orgánica y oxígeno en dióxido de carbono y agua en una etapa, con un requerimiento de superar una cierta energía de activación y liberación de energía en forma de luz y calor. Por otro lado, la respiración celular es un complejo proceso que involucra numerosas reacciones químicas, muchas de ellas mediadas por enzimas, compartimentalizadas y mecanismos de transporte de sustancias (ver Tabla 1).

Quienes eligieron estas opciones entienden a la respiración celular literalmente como equivalente de la combustión. No construyeron la idea que se trata de una analogía que implica la relación entre elementos de dos dominios distintos, tal como se analiza en la Tabla 1.

Opción h incorrecta. Durante la respiración celular no hay combinación de la glucosa y el oxígeno. La glucosa se degrada oxidativamente durante la glucólisis, en el citoplasma y el oxígeno se reduce a agua en el último paso de la cadena respiratoria en la membrana interna mitocondrial hacia la matriz mitocondrial. Por lo tanto, glucosa y oxígeno reaccionan en procesos distintos y no lo hacen entre sí.

En este caso es necesario diferenciar la representación del proceso en su conjunto mediante el lenguaje de reacciones químicas, de los modelos teóricos que permiten explicar la combustión y la respiración celular, según se presenta en la Tabla 1.

Dos docentes eligieron esta opción como correcta, el doble en porcentaje de estudiantes (26%) que también la eligió. Se pone en evidencia un error fundamental que

es una diferencia entre el proceso de respiración celular de la combustión química (ítem 1.d de la Tabla 1).

Opción f incorrecta. La opción supone que las moléculas de glucosa se transforman en ATP, lo cual implicaría que los átomos constituyentes de la glucosa, en uno de los pasos de la respiración celular, se convierten en constituyentes de las moléculas de ATP. Esto es una concepción errónea pues los átomos de la molécula de glucosa no son los que generan la molécula de ATP.

El porcentaje de elección es similar para docentes y estudiantes. Esta opción pone en evidencia que habría una idea subyacente que desconoce los complejos procesos de oxidación de glucosa en procesos de glucólisis y ciclo de Krebs, donde sus carbonos de desprenden como dióxido de carbono. A partir de la selección de esta opción, cabe postular que los sujetos indagados consideran que las moléculas de ATP se construirían a partir de carbonos de la glucosa. Este tipo de respuestas ameritan investigaciones ulteriores.

Opción l incorrecta. Durante la combustión de la glucosa el oxígeno se reduce y forma agua con átomos de hidrógeno y electrones de la molécula de glucosa. Sin embargo, en el caso de la respiración celular el oxígeno se reduce a agua al final de la cadena de transporte de electrones con electrones y protones que provienen de la oxidación de intermediarios previamente reducidos (NADH o FADH₂).

Modelo de combustión química

Opción c correcta. En las combustiones de todas las sustancias se libera energía en forma de calor y de luz, pero en las de combustible en estado gaseoso se forman llamas mientras que en las de combustibles sólidos, no. Es considerable que fuera elegida por pocos docentes y estudiantes porque es una característica de las reacciones de combustión. Este tipo de respuestas ameritan investigaciones ulteriores.

Opción i correcta. Durante una reacción de combustión combustible y comburente deben combinarse para que ocurra la reacción. Debe diferenciarse la analogía correcta entre el lenguaje químico de reacciones químicas de los conceptos teóricos que diferencian la combustión del proceso de respiración celular, según se mostró en la Tabla 1.

Hay una diferencia sustancial de elección entre docentes y estudiantes, que indicaría que el estudiantado no reconoce la combinación directa entre combustible y comburente durante la combustión (Ítems 1.d y 1.e, Tabla 1).

Opciones j y k correctas. Durante la combustión completa de materia orgánica -metano en la ecuación (1) y glucosa en la ecuación (2) que se presentan en el encabezado de la pregunta del cuestionario- el oxígeno se reduce y forma agua con los electrones y átomos de hidrógeno que provienen de la sustancia orgánica.

Modelos químicos generales

Opción e correcta. Esto opción hace referencia a un principio fundamental de la química que es la conservación de la materia durante las transformaciones químicas, que implica que durante una reacción química en un sistema aislado, la masa total en el sistema permanece constante (Galagovsky y Giudice, 2015).

Docentes la eligen en un 57% detectando que se refiere a un principio fundamental de la química que es la conservación de la materia durante una reacción química, en un sistema aislado. El porcentaje de elección por parte de estudiantes es menor a la mitad que al de docentes. Estos y estas estudiantes podrían considerar que la masa no se conserva durante las reacciones químicas o que puede transformarse en energía (esta concepción está relevada en investigaciones sobre ideas previas).

Conclusiones

En esta Investigación se presenta un análisis para relevar posibles fuentes de obstáculos en la enseñanza de la respiración celular, cuando desde distintos discursos expertos se presenta la misma comparada a la combustión química.

Los resultados obtenidos parecen indicar que la enseñanza tradicional mediante la comparación entre el modelo de combustión química y el modelo de respiración celular, que excluye una discusión epistemológica de sus alcances y limitaciones (Tabla 1), podría conducir a fallas en el aprendizaje. Estas fallas estarían generando, a su vez, obstáculos que impidieran futuros aprendizajes sustentables.

A su vez, los resultados de la indagación con estudiantes universitarios revelaron que ellos y ellas operarían con elementos memorizados sin conexión y sin cabal comprensión del concepto de combustión. Por lo tanto, el discurso biológico que presenta a la respiración celular como ejemplo de combustión estaría sustentado en un gran problema de comunicación entre personas expertas y novatas.

La combustión de materia orgánica y la respiración celular -en ambos casos de glucosa- son dos procesos cuyos modelos científicos son muy distintos, por lo cual analogarlos mediante los códigos de sus representaciones explícitas en el lenguaje de las reacciones químicas y mediante lenguaje verbal, debería ser analizado detenidamente frente a estudiantes.

Los problemas en la comunicación que se pueden generar entre docentes y estudiantes, debidos al uso del lenguaje de reacciones químicas, con sus alcances y restricciones sobre estequiometría y balance de masa (Galagovsky et al., 2015; Galagovsky y Giudice, 2015), sumado a la utilización ambigua del lenguaje verbal, pueden convertirse en obstáculos de un aprendizaje conceptual correcto.

Más allá de los datos anecdóticos sobre porcentajes de elecciones de docentes y estudiantes frente a las opciones del cuestionario, el análisis de esos datos indica aprendizajes de discursos conceptualmente erróneos para explicar los procesos de

combustión, respiración celular y la comparación entre ambos. Queda pendiente profundizar en la indagación de la naturaleza de estos errores conceptuales, mediante el análisis de las respuestas al cuestionario y de entrevistas orales a docentes y estudiantes, en futuras convocatorias, así como el conocimiento de los modelos mentales que construyen los estudiantes, o han construido los docentes en ejercicio, sobre los conceptos científicos relevados en este trabajo.

Referencias bibliográficas

- Alberts, B.; Johnson, A.; Lewis, J.M.D.; Raff, M.; Roberts, K.; Walter, P.; Wilson, J.T.H.; Durfort i Coll, M. y Llobera i Sande, M. (2014). *Biología Molecular de la Célula*. España: Ed. Omega.
- Andersson, B. (1986). Pupils' explanations of some aspects of chemical reactions. *Science Education*, 70(5): 549–563. <https://doi.org/10.1002/sce.3730700508>
- Andersson, B. (1990). Pupils' Conceptions of Matter and its Transformations (age 12-16), *Studies in Science Education*, 18(1): 53-85. <https://doi.org/10.1080/03057269008559981>
- Curtis, S.; Barnes, S.; Schnek, A. y Massarini, A. (2008). *Biología*. Séptima Edición en Español. Argentina: Editorial Médica Panamericana.
- 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(1): 31-40.
- Galagovsky, L.R., Di Giacomo, M.A., y Alí, S. (2015). Estequiometría y ley de conservación de la masa: lo que puede ocultar la simplificación del discurso experto. *Ciencia & Educação*, 21(2):351–360.
- Galagovsky, L.R. y Giudice, J. (2015). Estequiometría y ley de conservación de la masa: una relación a analizar desde la perspectiva de los lenguajes químicos. *Ciência & Educação (Bauru)*, 21(1):85–99.
- Galagovsky, L.R. y Greco, M. (2009). Uso de analogías para el "aprendizaje sustentable": El caso de la enseñanza de los niveles de organización en sistemas biológicos y sus propiedades emergentes. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias (REIEC)*, 4(1):10–33.
- Lodish, H.; Berk, A.; Kaiser, C.A.; Krieger, M.; Bretscher, A.; Ploegh, H.; Amon, A. y Martin, K.C. (2016). *Molecular Cell Biology*. 8th edition: Nueva York: W.H. Freeman and Company.
- Meheut, M.; Saltiel, E. y Tiberghien, A. (1985). Pupils' (11-12 years old) conceptions of combustion. *European Journal of Science Education*, 7(1): 37-41. <https://doi.org/10.1080/0140528850070109>
- Nelson, D. y Cox, M. (2017). *Lehninger principles of biochemistry*. 7th edition: Nueva York, EE.UU: W. H. Freeman and Company.
- Pérgola, M.S. y Galagovsky, L.R. (2019). La respiración celular como ejemplo de combustión. *Reflexión didáctica desde el análisis del lenguaje químico. Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias en Debate, Didáctica de las Ciencias Género e Inclusión Educativa en STEM (Vol. 1), X Congreso Iberoamericano de Educación Científica*, Montevideo, Uruguay: Universidad de Alcalá.
- Prieto, T. y Watson, R. (2007). Trabajo práctico y concepciones de los alumnos: la

combustión. Investigar en la enseñanza de la Química. *Nuevos horizontes: contextualizar y modelizar*, 115-140.

Talanquer, V. (2007). Explanations and teleology in chemistry education. *International Journal of Science Education*, 29(7): 853–870. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/09500690601087632> consultada el 1 de junio de 2016.

Tamayo Alzate, O.E.; Orrego Cardozo, M. y Dávila Posada, A.R. (2014). Modelos explicativos de los estudiantes acerca del concepto de respiración. *Revista Bio-grafía Escritos sobre la Biología y su enseñanza*, 7(13): 129–145. Disponible en: <https://doi.org/10.17227/20271034.vol.7num.13bio-grafia129.145> consultada el 1 de junio de 2016.

Tamayo Alzate, O.E. y Sanmartí, N. (2003). Estudio multidimensional de las representaciones mentales de los estudiantes. Aplicación al concepto de respiración. *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales, Niñez y Juventud*, 1(1):181–205.

Vasilachis de Gialdino, I.; Ameigeiras, A.; Chernobilsky, L.B.; Giménez Béliveau, V.; Mallimaci, F.; Mendizábal, N.; Quaranta, G.; Neiman, G.; Soneira, A.J.; Landau, L. y Castoriadis, C. (2006). *Estrategias de investigación cualitativa*. Barcelona: Editorial Gedisa, S.A.