

Innovación para la enseñanza de la Química

APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE HORMESIS EN LA ENSEÑANZA DE LA QUÍMICA DE LOS METALES DE TRANSICIÓN

Fabiana Lairion¹, Christian Saporito Magriñá¹, Alejandra Cimato², Margarita Martínez Sarrasague², Marisa Gabriela Repetto¹

1- *Universidad de Buenos Aires. Facultad de Farmacia y Bioquímica, Cátedra de Química General e Inorgánica; Instituto de Bioquímica y Medicina Molecular (IBIMOL, UBA-CONICET). Buenos Aires, Argentina.*

2- *Universidad de Buenos Aires. Facultad de Farmacia y Bioquímica, Cátedra de Física; Instituto de Bioquímica y Medicina Molecular (IBIMOL, UBA-CONICET). Buenos Aires, Argentina.*

E-mail: mrepetto@ffyb.uba.ar

Recibido: 17/09/2021. Aceptado: 12/05/2022.

Resumen. El objetivo de este trabajo es abordar el estudio de la química de los metales de transición, y más específicamente del hierro y del cobre asociando el concepto de hormesis con conocimientos previos de física y química y resultados experimentales de los docentes-investigadores. En el abordaje teórico de metales de transición se incluyen datos de bibliografía y resultados de investigación de los docentes, y se establecen relaciones con cálculos de dosis y concentración de soluciones, interpretación de gráficos, tablas y figuras. Asimismo, se incorpora el análisis de la participación de estos metales como catalizadores de reacciones de formación de especies reactivas del oxígeno y se discuten sus efectos tóxicos. Esta estrategia acerca a los estudiantes a la investigación científica, incrementa el interés, la atención y la participación en clase, y fortalece la incorporación de contenidos relacionados con la temática de los metales de transición.

Palabras clave. enseñanza, química, hormesis, bioelementos, conocimientos previos

Application of the concept of hormesis in the teaching of the chemistry of transition metals

Abstract. The aim of this work is to approach the study of the chemistry of transition metals, and more specifically of iron and copper, associating the concept of hormesis with previous knowledge of physics, chemistry and experimental results of the teacher-researchers. In the theoretical approach to transition metals, bibliographic data and research results of teachers are included, and relationships are established with dose and concentration of solutions calculus, interpretation of graphs, tables and figures. Likewise, the analysis of the participation of these metals as catalysts of reactions of reactive oxygen species formation is added and their toxic effects are discussed. This strategy brings students closer to scientific research, increases their interest, attention and participation in class, and strengthens the incorporation of content related to transition metals.

Keywords. teaching, chemistry, hormesis, bioelements, prior knowledge



INTRODUCCIÓN

La enseñanza de la Química General e Inorgánica constituye un desafío en la educación superior, ya que existen algunos obstáculos epistemológicos a la hora de su abordaje que se fueron incorporando en etapas iniciales de la educación escuela media y de la opinión general hacia la química. Estos obstáculos influyen en el aprendizaje de los estudiantes y uno de ellos es la imagen manifiesta de la química, que es la visión externa que la sociedad tiene de la disciplina. La enseñanza de los elementos químicos no escapa a este problema. Varios autores investigaron las diversas formas de abordar el problema proponiendo estrategias didácticas y diferentes formas de enseñar química para mejorar la enseñanza y motivar el aprendizaje (Godoy, 2020; Blanco, España y Rodríguez, 2012). Se han propuesto un abanico de métodos con el objetivo de sugerir estrategias didácticas que optimicen la labor docente universitaria. Algunas de las estrategias sugeridas incluyen la indagación en el aula (Caamaño, 2012), tanto de conocimientos previos como de la comprensión e intereses (motivación en el contexto) de los estudiantes (Larson, 2012; Franco Mariscal y Oliva Martínez, 2012), el aprendizaje basado en problemas (Sanmartí y Márquez, 2017), estudios de caso (Olivares, 2014) e introducción de juegos didácticos para el aprendizaje de los elementos de la tabla periódica (Franco Mariscal, Oliva Martínez, Blanco López y España Ramos, 2016).

Rodríguez Revelo y Alarcón Salvatierra (2020) resumieron en un proceso de análisis documental los resultados de estudios existentes y llegaron a la conclusión que "existe la necesidad de que todo profesor maneje estrategias didácticas como parte de las habilidades que debe poseer un docente para una mejor práctica en el aula y asegurar aprendizajes significativos en los estudiantes" (p,1).

Sin embargo, pocos estudios hacen referencia al estudio de los metales de transición. Un trabajo de investigación realizado sobre la enseñanza de la química de los metales de transición resume las distintas puertas de entrada para la enseñanza de la Química Inorgánica de los metales de transición. La conclusión de ese trabajo indica que el abordaje de esta enseñanza puede hacerse a partir de diferentes enfoques, integrando los mecanismos de acción de los metales de transición con los procesos bioquímicos que involucran la transferencia de electrones (metales redox activos) y la generación de radicales libres. Estos conceptos tienen su andamiaje en los conocimientos previos adquiridos por los alumnos en Química General: los organismos vivos como el resultado de la combinación organizada y con un nivel superior de complejidad de los elementos de la Tabla Periódica dirigidos por los principios básicos de la química (Repetto, 2012).

Actualmente y en la mayoría de las unidades académicas, la enseñanza de los metales de transición se realiza a través del abordaje clásico, a partir del análisis sistemático de las propiedades periódicas y las reacciones químicas características de cada grupo de la Tabla Periódica. Una propuesta innovadora publicada en el año 2012 sugería la enseñanza de la química de los metales de transición a través de un recorrido de los conocimientos previos adquiridos en Química General, con vistas hacia un enfoque biológico, farmacológico,

toxicológico y/o fisiopatológico que despierta sin lugar a dudas el interés de los estudiantes, además de abrirles un panorama aplicable de la química (Repetto, 2012).

Química inorgánica es una materia de segundo año de las carreras de Farmacia, Bioquímica, Tecnología de Alimentos y de diversas tecnicaturas. En esta disciplina, la enseñanza de la química inorgánica de los metales de transición se orienta principalmente al estudio de su configuración electrónica, propiedades físicas, formación de complejos, aplicaciones, usos industriales y reacciones químicas asociadas al comportamiento ácido-base, redox y solubilidad. Sin embargo, no es frecuente abordar su estudio desde una perspectiva aplicada a las carreras vinculadas con la salud.

Este método tradicional de enseñanza no fomenta la asociación, la reflexión y la vinculación de contenidos entre los distintos temas de química y menos aún entre las distintas disciplinas estudiadas. Esto conlleva a que los alumnos no valoren el rol de la química inorgánica en su formación profesional y pierdan interés en ahondar en los conocimientos impartidos.

Surgen entonces varios interrogantes: ¿cómo motivamos a los alumnos? ¿Cómo transmitimos la importancia de los contenidos curriculares que se abordan durante la cursada? ¿Cómo acortamos la brecha entre el estudio de grado y su futura actividad profesional? ¿Cómo vinculamos la investigación científica y los conocimientos previos con los contenidos de química inorgánica?

Procurando responder estos interrogantes es que planteamos una propuesta innovadora de enseñanza que contempla la incorporación del concepto de hormesis aplicado a los elementos de transición. El objetivo del trabajo narrado en este artículo es proponer una modalidad de clase integradora de contenidos teóricos sobre metales de transición, asociando dichos contenidos con la práctica profesional de las carreras en la que se enmarca esta asignatura y la experiencia científica de los docentes que la dictan.

Se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Integrar los conocimientos previos de los contenidos de la asignatura Química General e Inorgánica vistos en clases anteriores con el tema central de la clase "química de los metales de transición", y en relación al tema generador "hormesis", a partir del cual se integraron los contenidos en una secuencia didáctica.
2. Diseñar actividades de motivación para los estudiantes hacia el aprendizaje de los contenidos de la clase.
3. Proponer una estrategia de secuencia didáctica para la clase basada en los conocimientos previos, datos de bibliografía y resultados de investigación de los docentes.
4. Articular el fenómeno de hormesis con la práctica profesional en farmacia y en bioquímica, y con la investigación científica.
5. Integrar los contenidos teóricos con la práctica en el aula y en el laboratorio mediante el diseño de una secuencia didáctica en el marco de un modelo de investigación acción y la planificación de actividades de enseñanza.

CONCEPTO DE HORMESIS

A lo largo de la evolución, los organismos vivos han tenido que adaptarse a condiciones y agentes adversos para lograr sobrevivir, por lo que han desarrollado diversos y complejos mecanismos para lidiar con ellos. En la actualidad, se han identificado una serie de procesos conservados durante los cuales una dosis baja o subletal de un agente o estímulo estresante es capaz de activar una respuesta adaptativa que incrementa la resistencia de una célula u organismo frente a un estrés más severo. A esta respuesta se le conoce como hormesis (Mattson, 2008; Calabrese y col., 2011). Existen una gran variedad de agentes horméticos entre los que se encuentran la radiación, el calor, y los metales pesados, entre otros (Hoffman, 2009) (Figura 1).

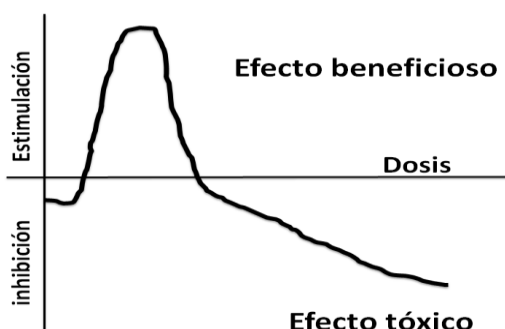


Figura 1: Concepto de hormesis. Efecto de la dosis y la respuesta biológica bifásica de un organismo vivo frente a un agente estresor (Boveris y Repetto, 2020).

El hierro (Fe) y el cobre (Cu) son biometales que muestran un comportamiento bifásico. Son esenciales y horméticos, a dosis bajas generan un efecto beneficioso pero a altas concentraciones producen efectos dañinos o tóxicos.

El cerebro se ve muy afectado por la sobrecarga de Fe y Cu. Por ejemplo, según datos publicados por nuestro grupo de investigación, con una sobrecarga aguda de Fe (dosis: 30 mg Fe/kg) y Cu (5 ug Cu/kg) en ratas se produce incremento del contenido de cada metal en el cerebro a las 6 horas del tratamiento con Fe y a las 16 horas de la sobrecarga aguda con Cu (Musacco Sebío y col., 2014a) (Figura 2).

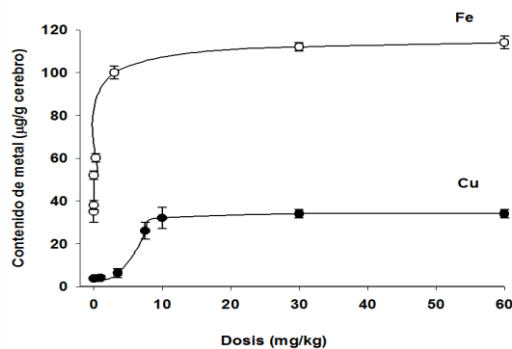


Figura 2: Contenido de Fe y Cu en cerebro de rata en función de la dosis administrada por sobrecarga aguda (Musacco Sebío y col., 2014a).

Este incremento de los metales induce la catálisis no enzimática de descomposición de peróxidos, generados por el metabolismo de la respiración celular (peróxido de hidrógeno, H_2O_2) y de la oxidación de lípidos (ROOH). El mecanismo de toxicidad se asocia a la producción de especies oxidantes y reactivas (radical libre hidroxilo) en reacciones químicas catalizadas por iones de estos metales, que daña las macromoléculas y promueve la lesión oxidativa de las neuronas y la muerte celular (Boveris y Repetto, 2020) (Figura 3).

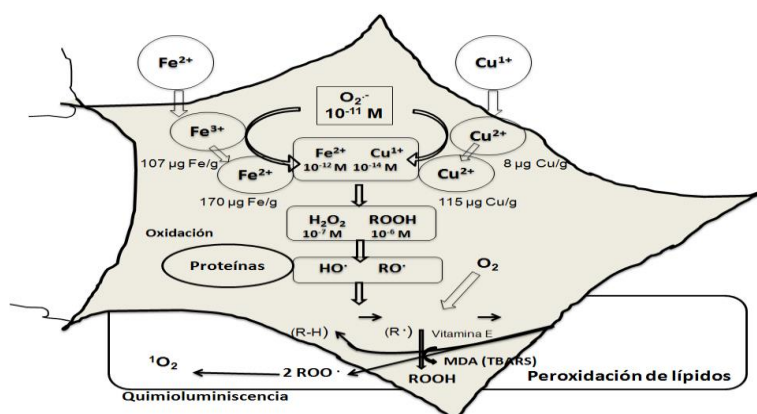


Figura 3. Comportamiento hormético de Hierro (Fe) y Cobre (Cu) en cerebro de rata (Adaptado de Boveris y Repetto, 2020).

METODOLOGÍA

Nuestra propuesta consistió en incluir, en la clase teórica de metales de transición, publicaciones científicas de diversos autores, así como también resultados de las investigaciones realizadas por los docentes-investigadores de la cátedra. El estudio realizado fue de tipo observacional analítico, de diseño cualitativo, en un modelo de investigación-acción.

En la planificación de la propuesta se trabajó según el modelo de secuencia didáctica, que consiste en una estructura de inicio, desarrollo y cierre. Una secuencia didáctica es una serie de actividades ordenadas en una secuencia que se relacionan entre sí. Permite enseñar un conjunto determinado de contenidos, donde las actividades de aprendizaje con y para los estudiantes se organizan con la finalidad de crear situaciones que permitan desarrollar un aprendizaje significativo (Díaz Barriga, 2013).

El enfoque de este proyecto se enmarca en la propuesta de planificación como una secuencia didáctica integradora, con un enfoque activo y a partir del desarrollo de un problema o actividad integradora, que relaciona el objetivo de la enseñanza, qué es lo que se quiere enseñar con los contenidos seleccionados (saberes y saber hacer), y se piensan la secuencia didáctica y la evaluación de los aprendizajes. La secuencia didáctica se organizó combinando el modelo lineal de secuencia didáctica pero a partir del desarrollo de un problema o actividad integradora, que en este proyecto será el tema central "metales de transición" y generador "hormesis".

Para cumplir con los objetivos específicos de enseñanza 1 y 2 propuestos para esta clase se realizó un repaso e indagación de conocimientos previos

(contenidos vistos en clase anteriores) al inicio de la clase para relacionar estos contenidos con el tema central en la secuencia didáctica, en torno al tema generador articulando con las actividades propuestas. En la etapa de inicio de la secuencia didáctica se plantearon también actividades de motivación como disparadoras de la clase y la enseñanza de los contenidos: un breve video, lectura previa de aplicaciones prácticas, de reportes interesantes de la vida cotidiana o de la profesión acerca de los metales de transición. Los objetivos de aprendizaje y contenidos de la clase que corresponden a la etapa de inicio de la secuencia didáctica se encontraban disponibles para los estudiantes en el campus virtual, en el programa de la asignatura y en cada uno de los materiales de estudio propuestos para la clase. También se mencionaron al inicio de la clase.

Para cumplir con los objetivos específicos de enseñanza 3 a 5, se seleccionaron los contenidos para cada etapa de la secuencia didáctica. Esos contenidos corresponden a los contenidos mínimos de la unidad temática del programa de la asignatura. En la secuencia didáctica se organizaron los contenidos de manera tal que los contenidos nuevos se relacionaban con los previos, partiendo de los contenidos más sencillos a los más complejos, con retroalimentación constante e interrelación entre los mismos.

Las actividades a desarrollar en el aula incluían la discusión de contenidos y la asociación con los ya vistos en clases anteriores. Para el abordaje de los nuevos temas se empleó el modo de enseñanza en el que la primera actividad de la clase se articulaba con la última vista en la clase anterior, o se retoma a manera de repaso algún contenido para reforzar y complejizarlo con los nuevos contenidos. Los medios y recursos eran los materiales de estudio disponibles en el campus virtual de la asignatura, alojada en la página web de la facultad. Los materiales consistían en presentaciones en formato video con audios de los contenidos a desarrollar en la clase, y acompañados por los textos correspondientes a cada pantalla y audio. También incluyen materiales de estudio con información teórica y guía de ejercitación con tres tipos de ejercicios: preguntas de autoevaluación sobre los contenidos, preguntas de aplicación mediante la resolución de ejercicios, y preguntas adicionales para reforzar el estudio, ejercicios tipo resueltos y desarrollados en detalle, videos de aplicación de los contenidos y actividades a realizar en trabajos prácticos posteriores.

Las actividades en el desarrollo de la secuencia didáctica consistieron en:

- a. actividades en el campus virtual (asincrónicas) como lectura previa de los materiales, visualización de videos y resolución de la ejercitación;
- b. Discusión de contenidos teóricos propios de la unidad relacionado con conocimientos previos y contenidos vistos en clases anteriores, como así también aplicaciones hacia la profesión y relación tanto con materias que se cursan con posterioridad como temas que corresponden a unidades temáticas posteriores del programa de esta asignatura. Se trabajó en base al estado del arte del tema, los conceptos de hormesis y propiedades químicas de los metales de transición. Los contenidos se relacionaron con las preguntas de autoevaluación, ejercicios de resolución durante la clase y experimentos a realizar en el laboratorio de trabajos prácticos.

- c. Resolución de ejercicios de aplicación de contenidos desarrollados en clase.
- d. Integración y cierre con la realización de una discusión de resultados experimentales tomados de la investigación científica de los docentes acerca del tema, que integra los contenidos vistos en la clase con contenidos previos, articulando la teoría con la práctica en la discusión de los resultados y de las conclusiones en forma oral al final de la clase y en la elaboración de una breve conclusión.

La propuesta de la secuencia didáctica para la enseñanza de este tema comprende el diseño de actividades integradoras para cada una de las tres etapas de la secuencia didáctica:

1. Etapa de inicio. En esta etapa se planteó "qué enseñar". Para ello es necesario posicionarse en el contexto de la asignatura y de los estudiantes, plantearse los objetivos, incentivar la motivación, definir los procesos cognitivos a desarrollar en los estudiantes: entender, analizar, deducir, interpretar, relacionar, comparar, integrar, resolver, aplicar y aprender, y diagnosticar lo que los estudiantes saben y cómo lo pueden aplicar, se trabajan las competencias de saber y de saber hacer.

2. Etapa de desarrollo. En esta etapa de la secuencia didáctica se trabajó con la aplicación del saber. Se mostraron ejemplos sobre efectos beneficiosos o tóxicos del hierro y el cobre, enfermedades relacionadas, metabolismo y fisiología, y se desarrollaron actividades de práctica (cálculo de concentración, dosis, vida media, análisis de resultados de investigación), preguntas de orden cognitivo superior para la comprensión de contenidos y preguntas de metacognición, para tomar conocimiento del aprendizaje, apropiarse de ese conocimiento, en clase y en el campus.

Se propone la metodología de acción para las clases y la propuesta responde a la siguiente pregunta: ¿Con qué voy a enseñar? ¿Cuáles son los espacios necesarios y cómo se organizarán los recursos y el tiempo? Se trabajó con la bibliografía previamente disponible en el campus con el objetivo de mostrar el rol que cumplen el Fe y el Cu como cofactores de enzimas que intervienen en diversas reacciones bioquímicas, tales como la superóxido dismutasa y la citocromo oxidasa, así como también los trastornos ocasionados por el déficit de estos elementos en la salud humana, haciendo referencia al concepto de hormesis.

Además, para evaluar los efectos tóxicos a dosis altas, se analizaron los resultados experimentales obtenidos en un ensayo realizado por docentes de la cátedra, que tenía como objetivo estudiar los efectos de una sobrecarga aguda o crónica de Fe o Cu en ratas. Analizamos los valores de contenido de Fe y Cu medidos por absorción atómica en hígado y cerebro de ratas y de diversos biomarcadores de estrés oxidativo. A partir de datos sin procesar, se realizaron en clase los cálculos de dosis y de concentración de soluciones; asimismo les mostramos gráficos, tablas y figuras para que se familiaricen con la interpretación de estas formas de presentación de la información. Se incorporaron ejercicios de práctica en el campus para reforzar estos conocimientos. Esta estrategia permitió estudiar la participación de estos metales como catalizadores de reacciones de formación de especies reactivas del oxígeno y discutir sus efectos tóxicos.

3. Etapa de cierre se realizaron actividades para que el alumno demuestre lo que sabe mediante propuestas de evaluación formativa: construcción de un diagrama o mapa conceptual y elaboración de una conclusión. Se analizaron las respuestas obtenidas en las actividades del campus, consultas en los foros y preguntas en clase en comparación con las clases anteriores en las que no se utilizó esta modalidad. Varios estudiantes manifestaron un mayor interés en la actividad científica que se realiza en la cátedra y en inscribirse en la escuela de ayudantes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Asociación de contenidos nuevos con conocimientos previos

A partir del estudio de las propiedades de los metales de transición correspondientes a esta clase, se introdujo el concepto de hormesis, nuevo para los estudiantes de esta asignatura.

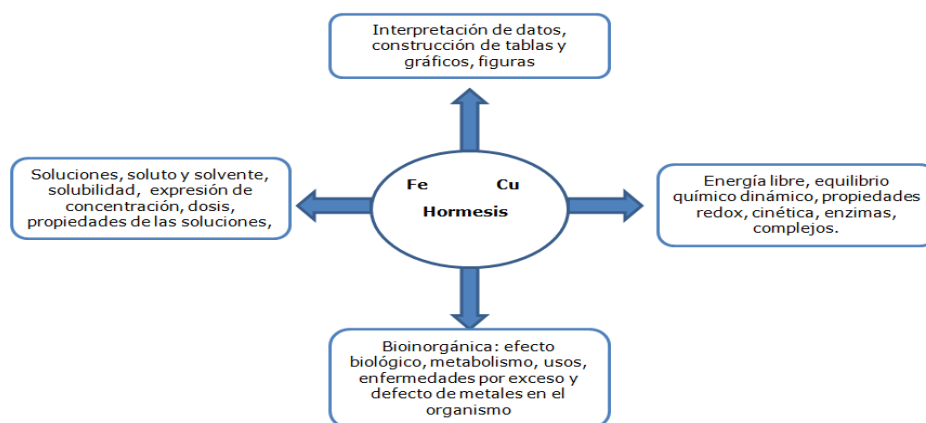


Figura 4. Esquema que relaciona las propiedades químicas de los metales de transición Fe y Cu con el concepto de hormesis y los conocimientos previos aprendidos en clases previas de la asignatura asociando los mismos a la bioinorgánica y participación en procesos biológicos.

Estos contenidos se relacionaron con la formación de compuestos químicos y las propiedades ácido base de estos compuestos, la formación de precipitados y su redisolución. Se repasaron contenidos vistos en las primeras clases y en los trabajos prácticos precedentes tales como la preparación de soluciones, propiedades de las soluciones, entre otros (Figura 4) y las formas de expresar la concentración (Figura 2).

Asociación con la profesión bioquímica y farmacéutica

A partir de la bibliografía propuesta se vio cómo los fenómenos horméticos se investigan para encontrar la ventana terapéutica de un fármaco donde una dosis alta puede ser letal y una dosis muy baja no produce respuesta. La respuesta hormética permite establecer cuál es la dosis con la que se produce la respuesta beneficiosa en el organismo.

El concepto de hormesis también se aplica al precondicionamiento, que es un sistema que se puede utilizar para encontrar posteriormente una respuesta hormética. El primer ejemplo de precondicionamiento se originó en los años 20 del siglo pasado exponiendo a varios tipos de plantas a

radiaciones ionizantes. Después de 50 años se observó que dosis bajas de radiaciones creaban una respuesta adaptativa que protegía a las plantas de las mutaciones producidas por radiaciones ionizantes de mayor intensidad y el precondicionamiento en fisiopatología mitocondrial también es un fenómeno de hormesis en los organismos aeróbicos (Pérez y col., 2016).

Analizamos además algunos ejemplos de esta respuesta adaptativa beneficiosa como los cambios que tuvieron que realizar los organismos frente a la exposición a Cu y Fe, que, al desprenderse de las rocas, contaminaban las aguas dulces y el mar. Estos iones metálicos resultaban tóxicos para diversos organismos porque daban lugar a la producción de radicales libres, y de este modo dañaban y mataban a los seres orgánicos más simples. El resultado adaptativo y hormético fue la aparición de varias enzimas (citocromo oxidasa, oxidasa multicobre, superóxido dismutasa) que por su función reducían el riesgo tóxico de estos metales. Durante la clase se analizaron los gráficos de actividad enzimática y supervivencia mostrando que a dosis bajas existe un aumento de la actividad enzimática y una respuesta adaptativa (Figura 5A), a dosis altas el porcentaje de supervivencia es muy bajo debido al efecto tóxico del metal (Figura 5B).

Luego, con la evolución a seres más complejos como los mamíferos estos metales pasaron a tener funciones relevantes, como por ejemplo la unión del hierro con la Hemoglobina para el transporte de oxígeno a los tejidos, una función tan importante para el organismo. La respuesta hormética también involucra la expresión de una gran cantidad de genes que codifican para proteínas citoprotectoras como las chaperonas del tipo de las que responden a estrés térmico, las enzimas antioxidantes, los factores de crecimiento y las metalotioneínas, entre otras. (Rattan, Fernandes, Demirovic, Dymek y Lima, 2009)

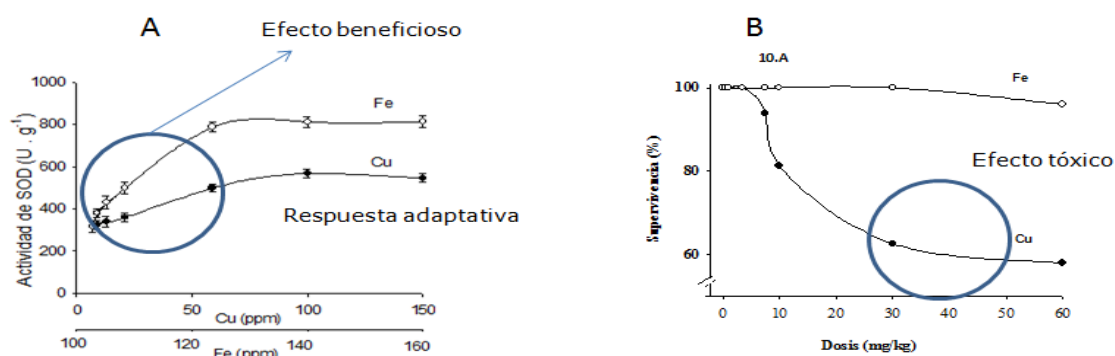


Figura 5. Efecto hormético de la sobrecarga aguda de Fe y Cu en hígado de ratas. A: actividad de la enzima antioxidante superóxido dismutasa (SOD), B: supervivencia de los animales (Tomado de Musacco Sebio y col., 2014b).

Asociación con la investigación científica

Los iones de metales de transición Fe(II) y Cu(II) participan en las reacciones químicas en las que se generan las especies reactivas del oxígeno (ROS), catalizando la descomposición del peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y la

formación del radical hidroxilo ($\text{HO}\cdot$), una especie muy tóxica y oxidante, en la reacción de Fenton-Haber-Weiss. Estas especies se generan en el citosol y mitocondrias en las células. Las mitocondrias son las organelas intracelulares que actúan como la fuente de energía de la célula, ya que generan ATP en el proceso llamado fosforilación oxidativa. Durante este proceso, las mitocondrias también producen ROS como subproductos. Si la concentración de ROS excede los niveles fisiológicos de estas especies (concentraciones en estado estacionario, donde la velocidad de generación de estas especies es igual a la velocidad con la que se consumen), generan efectos dañinos en células y tejidos mediante procesos bioquímicos oxidativos que afectan a los componentes celulares, incluyendo las proteínas, los lípidos y ADN. Mitohormesis es un proceso en donde las especies reactivas del oxígeno (ROS) producidas por las mitocondrias en una concentración inferior actúan como moléculas de la transmisión de señales para iniciar una cascada de las acciones celulares que protegen a las células contra efectos dañinos (Saporito Magriñá y col., 2017).

A través de la presentación de resultados de investigación empleando gráficos, figuras y tablas se trabajó también con este tipo de materiales, analizando la construcción de los mismos, la información que brindan y su interpretación en el marco del estudio realizado (Figura 6).

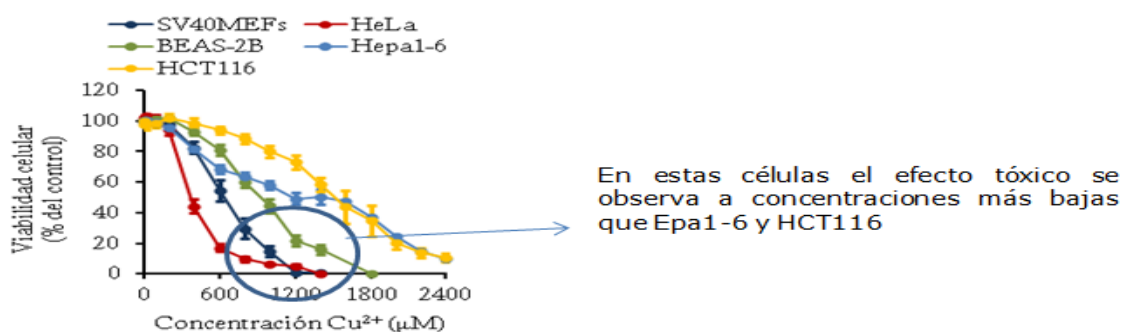


Figura 6. Viabilidad de las células expuestas a distintas concentraciones de cobre. (Tomado de Saporito Magriñá y col., 2018).

A partir del análisis e interpretación de datos y gráficos se pudo relacionar el efecto biológico que genera el incremento de la concentración intracelular del cobre y la supervivencia de las células expuestas al metal.

Esta estrategia permitió estudiar la participación de estos metales como catalizadores de reacciones de formación de especies reactivas del oxígeno y discutir sus efectos tóxicos (Figura 6).

CONCLUSIONES E IMPLICANCIAS

Durante esta experiencia empleando este recurso didáctico, los estudiantes realizaron aportes relacionados con los efectos de estos elementos en situaciones cotidianas e información obtenida a partir de noticias de actualidad como también se acercaron a los docentes mostrando interés en participar de los grupos de investigación y escuela de ayudantes.

Creemos que esta estrategia acerca a los estudiantes a la investigación científica, incrementado el interés, la atención y la participación en clase, fortaleciendo la incorporación de contenidos relacionados con los metales de transición.

Las perspectivas a futuro de esta modalidad de clase consisten en ampliar esta propuesta a otros iones de metales de transición y elementos esenciales de la Tabla Periódica; aprovechar el recurso de vinculación de contenidos con el ejercicio profesional y la investigación; y extrapolar esta experiencia a otros contenidos diferentes a la hormesis de los metales de transición, por ejemplo, funciones fisiológicas, participación en procesos fisiopatológicos, metabolismo celular y formulaciones farmacéuticas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blanco, A., España, E., Rodríguez, F. (2012). Contexto y enseñanza de la competencia científica. *Alambique, Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 70, 9-18.
- Boveris A. y Repetto M.G. (2020) *Brain mitochondria: distribution and function*. New York: Nova Science Publishers.
- Caamaño, A. (2012). ¿Cómo introducir la indagación en el aula? Los trabajos prácticos investigativos. *Alambique, Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 70, 83-91.
- Calabrese, V., Cornelius, C., Cuzzocre, S., Iavicoli, I., Rizzarelli, E., Calabrese, E. (2011). Hormesis, cellular stress response and vitagenes as critical determinants in aging and longevity, *Mol Asp Med*, 32, 279-304. <https://doi.org/10.1016/j.mam.2011.10.007>
- Díaz-Barriga, Á. (2013). Guía para la elaboración de una secuencia didáctica. *UNAM*, 10(04), 1-15.
- Franco-Mariscal, A. J., Oliva-Martínez, J. M. (2012). Dificultades de comprensión de nociones relativas a la clasificación periódica de los elementos químicos: La opinión de profesores e investigadores en educación química. *Revista Científica*, 16(2), 53-71.
- Franco-Mariscal A. J., Oliva-Martínez J. M., Blanco-López, A., España-Ramos, E. (2016). A Game-Based Approach to Learning the Idea of Chemical Elements and Their Periodic Classification. *Journal of Chemical Education*, 93, 1173-1190.
- Godoy, K. M. (2020). Estrategias didácticas para la enseñanza y aprendizaje de los elementos químicos y su información en la tabla periódica. *Educación las Américas*, 10.
- Hoffmann, G. R. (2009). A perspective on the scientific, philosophical, and policy dimensions of hormesis, *Dose-Response*, 7, 1-51.
- Larson K. G., Long G. R., Briggs M. W. (2012). Periodic Properties and Inquiry: Student Mental Models Observed during a Periodic Table Puzzle Activity. *Journal of Chemical Education*, 89, 1491-1498.

- Mattson, M.P. (2008). Hormesis defined, *Ageing Res Rev*, 7, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.arr.2007.08.007>
- Musacco-Sebio, R., Ferrarotti, N., Saporito-Magriñá, C., Semprine, J., Fuda, J., Torti, H., Boveris, A., Repetto, M.G. (2014). Oxidative damage to rat brain in iron and copper overloads, *Metallomics*, 6(8), 1410-1416. <https://doi.org/10.1039/c3mt00378g>
- Musacco-Sebio, R., Saporito-Magriñá, C., Semprine, J., Torti, H., Ferrarotti, N., Repetto, M.G. (2014). Rat liver antioxidant response to iron and copper overloads, *J Inorg Biochem*, 137, 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2014.04.014>
- Olivares S. (2014). ¿Formulación química? Nomenclatura química. *Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 11(3), 416-425.
- Perez, V., D'Annunzio, V., Valdez, L.B., Zaobornij, T., Bombicino, S., Mazo, T., Longo Carbajosa, N., Gironacci, M., Boveris, A., Sadoshima, J., Gelpi, R. (2016). Thioredoxin-1 Attenuates Ventricular and Mitochondrial Postischemic Dysfunction in the Stunned Myocardium of Transgenic Mice, *Antioxidants & Redox Signaling*, 25, 78-88. <https://doi.org/10.1089/ars.2015.6459>
- Rattan, S.I., Fernandes, R.A., Demirovic, D., Dymek, B., Lima, C.F. (2009). Heat stress and hormetin-induced hormesis in human cells: effects on aging, wound healing, angiogenesis, and differentiation, *Dose-Response*, 7, 90-103. <https://doi.org/10.2203/dose-response.08-014.Rattan>
- Repetto M. (2012). Enfoque didáctico para la enseñanza de la química de los metales de transición: Bioinorgánica, homeostasis redox y toxicidad de los metales de transición en sistemas biológicos, *Educación en la Química*, 18(1) 3-15.
- Rodríguez Revelo, E., Alarcón Salvatierra, P.A. (2020). Estrategias didácticas para efectivizar procesos de enseñanza en la educación superior. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 12. <http://www.dilemascontemporaneoseduccionpoliticayvalores.com/>
- Sanmartí, N., Márquez, C. (2017). Aprendizaje de las ciencias basado en proyectos: del contexto a la acción. *Ápice. Revista de Educación Científica* 1(1), 3-16. <https://doi.org/10.17979/arec.2017.1.1.2020>
- Saporito-Magriñá, C., Musacco-Sebio, R., Acosta, J. M., Bajicoff, S., Paredes-Fleitas, P., Boveris, A., Repetto, M. G. (2017). Rat liver mitochondrial dysfunction by addition of copper(II) or iron(III) ions, *J Inorg Biochem*, 166, 5-11. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2016.10.009>
- Saporito-Magriñá, C., Musacco-Sebio, R., Andrieux, G., Kook, L., Orrego, M., Tuttolomondo, M. V., Desimone, M., Boerries, M., Borner, C., Repetto, M.G. (2018). Copper-induced cell death and the protective role of glutathione: the implication of impaired protein folding rather than oxidative stress, *Metallomics*, 10(12), 1743-1754. <https://doi.org/10.1039/c8mt00182k>